

<Review>

K-장석을 이용한 IRSL (Infrared Stimulated Luminescence)
연대측정의 원리와 적용

홍성찬^{1,2} · 최정현^{1,3,*} · 여은영¹ · 김종욱²

¹한국기초과학지원연구원 오창센터 환경과학연구부

²서울대학교 지리교육과

³과학기술연합대학원대학교 동위원소지구화학과

요 약

이 논평에서는 최근 활발하게 연구되고 있는 K-장석 IRSL 연대측정법의 이론과 적용사례를 간단히 정리하고, 향후 국내에서의 전망에 대해서 논의하였다. K-장석 IRSL 신호가 석영 OSL 연대측정법으로는 논란의 여지가 있는 오래된 퇴적층의 연대(> 200 ka)를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있음에도 불구하고, anomalous fading과 같은 치명적인 단점으로 인해 그 동안 다양한 퇴적물의 연대측정에 한계가 있었다. 또한, 연간선량 추정에 있어서도, K-장석 내부의 방사성동위원소의 존재로 인한 내부연간선량 등, 석영 OSL 연대측정법과는 달리 신뢰도 높은 연대 결과를 도출하기 위해 고려해야 하는 요소들이 다양하다. 최근 발표되고 있는 post IR-IRSL 신호를 이용한 일련의 연구결과들은 anomalous fading의 영향을 최소화하여 K-장석 IRSL 연대측정의 활용도를 크게 높이고 있으며, 다양한 환경의 퇴적층의 연대측정에 성공적으로 적용되고 있다. 현재 진행되고 있는 기술적/이론적 발전과 더불어 국내에서도 K-장석 IRSL 연대측정법을 활용한 연구결과들이 점차 증가하고 있으며, 앞으로 석영 OSL 연대측정법과 함께, 여러 퇴적환경에서 형성된 다양한 퇴적층의 연대측정에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어: K-장석, IRSL (Infrared Stimulated Luminescence), anomalous fading, post IR-IRSL, 내부연간선량

Seongchan Hong, Jeong-Heon Choi, Eun-Young Yeo and Jong-Wook Kim, 2013, Principles of K-Feldspar IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) Dating and Its Applications. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 2, p. 305-324

ABSTRACT: In this review, we briefly introduce the basic principles of K-feldspar IRSL dating method, with a few case studies. Although K-feldspar IRSL signals are useful for dating old samples beyond usual quartz OSL age range (> 200 ka), the application has been limited, mainly due to anomalous fading, which usually causes age underestimation. Also, in terms of dose rate estimation, unlike quartz OSL dating, internal (or intrinsic) absorption of ionizing radiation, due to radioactive elements within the crystal lattice (e.g., ⁴⁰K and ⁸⁷Rb), should be taken into account. Recent advances in K-feldspar IRSL dating have focused on the use of less or non-fading IRSL signal component, namely post IR-IRSL signals measured at elevated temperatures. In several case studies, the post IR-IRSL ages are reported to be encouraging, showing ages which are in good agreement with other independent age controls. With these and other theoretical and instrumental developments, we consider that K-feldspar IRSL dating methods, together with quartz OSL dating, can be more actively applied to various sediment samples, covering wider age ranges than before.

Key words: K-feldspars, IRSL (Infrared Stimulated Luminescence), anomalous fading, post IR-IRSL, internal dose rate

(Seongchan Hong, Jeong-Heon Choi and Eun-Young Yeo, Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Ochang Center, Chungbuk 363-883, Korea; Seongchan Hong and Jong-Wook Kim, Department of Geography Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea; Jeong-Heon Choi, Department of Isotope Geochemistry, University of Science and Technology, Daejeon 305-350, Korea)

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

1. 서 언

초기의 루미네선스 연대측정은 도자기(pottery)와 같은 고고유물에서 분리한 시료를 대상으로 이들이 최종적으로 열사건(thermal event)을 겪은 이후 경과한 시간을 측정하는 열 루미네선스(ThermoLuminescence, TL) 연대측정법이 일반적이었다. 이들 초기의 TL 연대측정에서는 석영과 장석입자를 개별적으로 분리하지 않은 복합입자시료(polymineral samples)를 사용하였다(e.g., Aitken *et al.*, 1968). 이후, 시료를 열 대신 빛으로 여기하여 루미네선스 신호를 얻기 위한 실험적/기기적 발전과정을 거치며, 석영입자를 이용한 광여기 루미네선스 연대측정(Optically Stimulated Luminescence Dating, OSL 연대측정)의 가능성이 Huntley *et al.* (1985)에 의해 최초로 제기되었다. 석영입자는 광물화학적 구조가 다른 광물에 비해 매우 간단하여, 석영입자의 격자구조 및 화학조성과 루미네선스 신호 사이의 상관관계에 대한 이해가 비교적 용이하며(e.g., Preusser *et al.*, 2009 and references therein), 석영입자에서 관찰되는 OSL 신호 특성을 정의하기 위한 물리적 모델도 다른 광물에 비해 체계적으로 잘 정립되어 있다(e.g., Chapter 2 in Bøtter-Jensen *et al.*, 2003). 이러한 이유로, 석영입자는 OSL 연대측정법 개발 초기 단계에서부터 연대측정 대상광물로 가장 널리 사용되어 왔으며, 지난 10여년 동안 이루어진 다양한 실험절차상의 개선을 토대로 다른 연대측정법(e.g., 방사성탄소연대측정법)에 대한 보조적 역할을 넘어 독립적인 연대측정법으로서 다양한 제4기 지질매체에 대한 연대측정에 폭넓게 적용되고 있다(여러 퇴적환경에 대한 석영 OSL 연대측정법의 적용사례는 Boreas vol. 37 (2008), Issue 4 “Special Issue: Luminescence dating of Quaternary sediments”를 참고).

석영 OSL 연대측정법 개발과 거의 비슷한 시기에 K-장석입자에 대한 루미네선스 연대측정(K-장석 IRSL 연대측정) 가능성도 연구되기 시작하였다(Hütt *et al.*, 1988)(주. 연대측정을 목적으로 하는 많은 연구에서 OSL 연대측정법은 흔히 석영을 청색파장의 광원으로 여기시켜 얻은 신호를 이용하여 지질매체가 최종적으로 빛에 노출된 이후 경과한 시간을 추정하는 연대측정법으로 받아들여지고 있으며, 일반적으로 OSL 연대측정이라함은 석영을 이용한 루미네선스 연대측정을 의미한다. 반면에 K-장석 연대측정은 IR 파장의 광원으

로 여기시켜 발생된 루미네선스 신호를 이용하여 연대측정을 실시하기 때문에, 일반적으로 K-장석 IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) 연대측정이라 한다. 이 논평에서도 K-장석에 대한 루미네선스 연대측정을 “K-장석 IRSL 연대측정”이라 한다). 하지만, Wintle (1973)이 여러 광물시료의 TL 신호에 대한 연구를 통해 제안한 바와 같이, K-장석입자는 빛 혹은 열 등의 외부에너지를 가하지 않아도 루미네선스 신호가 상온에서 자연적으로 감소하는 소위 ‘anomalous fading’ 현상을 보이며, 이로 인해 IRSL 연대측정결과가 실제 퇴적연대보다 과소평가 될 수 있음이 알려져 왔다(e.g., Wallinga *et al.*, 2001). 이 anomalous fading 현상은 지금까지의 루미네선스 연대측정법의 개발과 적용이 주로 석영 OSL 연대측정법에 국한되어 이루어진 주된 요인이었고, 캐나다의 퀘벡대학(Université du Québec)을 중심으로 이 현상을 극복하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어왔다(Lamothe and Auclair, 1999; Huntley and Lamothe, 2001; Auclair *et al.*, 2003; Lamothe *et al.*, 2003; Kars *et al.*, 2008). 이들의 연구는 주로 실험실에서 일정한 양의 방사선을 흡수한 장석시료의 IRSL 신호가 시간에 따라 자연적으로 감소하는 정도를 측정하여 IRSL 신호 감소율(IRSL fading rate)을 구하고, 이를 바탕으로 K-장석 IRSL 연대결과를 보정(fading rate correction)하는 보정법개발에 주안점을 두었다(3.4절 “Anomalous Fading과 IRSL 연대보정”참조). 하지만, 많은 경우, 감소율측정의 재현성(reproducibility)이 극히 불량할 뿐만 아니라, 측정된 감소율을 적용하여 보정된 연대가 여타 다른 연대측정법으로 추정된 연대와 일치하지 않는 경우가 많아, 연대결과의 신뢰도에 의문이 제기되어 왔다. 이런 이유들로 인해, 최근에는 anomalous fading 현상이 거의 일어나지 않거나 그 정도가 무시할 만한 IRSL 신호요소를 추출하기 위한 노력들이 계속되고 있다(Thomsen *et al.*, 2008; Buylaert *et al.*, 2009; Li and Li, 2011a).

이와 같은 단점에도 불구하고, K-장석입자가 루미네선스 연대측정대상 물질로서 지속적인 연구의 대상이 되는 이유는, 일반적으로, K-장석입자의 IRSL 신호가 석영입자의 OSL 신호에 비해 월등히 높은 포화선량값(dose saturation level)을 보이며, 따라서, 더 오래된 퇴적물에 대한 연대측정이 가능하기 때문이다. 즉, 석영의 OSL 신호는, 시료의 특성에 따라

다를 수는 있지만, 일반적으로 약 250-350 Gy 내에서 포화되기 시작하는 데, 만일 석영입자가 주변 퇴적물로부터 단위시간당 흡수하는 방사선량(연간 선량, dose rate)을 약 $3 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ 로 가정하면 약 80-120 ka 내외를 연대측정상한으로 볼 수 있다. 이에 반해, K-장석 IRSL 신호의 포화선량값은 대개 ~1500-2000 Gy로 석영 OSL 신호를 이용했을 때보다 훨씬 오래된 퇴적물(> 500 ka)에 대한 연대측정이 가능하게 된다. 따라서, 후기 플라이스토세 이전 퇴적물에 대한 적절한 연대측정법을 찾기가 항상 가능하지 않다는 점을 감안하면, K-장석 IRSL 연대측정법은 이에 대한 대안이 될 수 있을 것이다. 또한, 연대측정 상한연장 목적이외에도, 석영의 루미네선스 신호가 미약하여 연대측정에 어려움이 있는 젊은 퇴적층 혹은, 석영입자가 드문 화산지대의 퇴적물에 대한 연대측정에서도 장점을 지닌다.

K-장석 IRSL 연대측정법에 대해서는 그 동안 무수한 연구결과들이 발표되어 왔으나, 아직 국내 연구자들에게는 생소한 부분이 많아, 논평에서는 K-장석을 이용한 IRSL 연대측정법의 원리와 최근 논의되고 있는 연구방향을, 가능한 한 많은 참고문헌들과 함께 간단히 소개하였다. 이와 더불어, 대표적인 국내의 몇몇 연구사례들을 정리하여, 향후 국내의 연대측정 연구 수행에도 참고가 될 수 있도록 하였다.

2. 루미네선스 측정장비

현재 루미네선스 연대측정은 일반적으로 덴마크

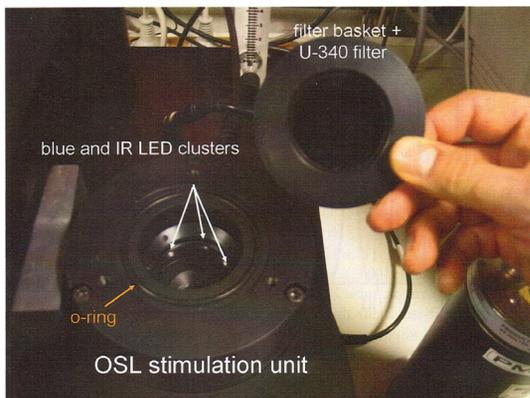


Fig. 1. Location of IR LEDs for stimulation of K-feldspar IRSL signal (from Risø DTU, 2010).

Risø DTU (Technical University of Denmark), 미국의 Daybreak사 그리고, 독일의 Freiberg사 등에서 제작된 상용장비를 이용하여 이루어지고 있다. 이 중에서 국내에서 수행되고 있는 거의 대부분의 루미네선스 연대측정이 Risø DTU에서 제작된 TL/OSL-DA 시리즈로 이루어지고 있고, 이에 대한 기본적인 설명(방사선원, 검출기 등)은 Choi *et al.* (2004)의 “2.2.1. 루미네선스 자동측정장비”에서 다루었기 때문에, 이번 논평에서는 Risø DTU 장비 중 K-장석 IRSL 연대측정과 관련된 여기광원과 검출필터 부분에 대해서만 간단히 정리하였다.

이미, “1. 서언”에서 언급한 바와 같이, K-장석 IRSL 신호는 K-장석입자를 IR 파장의 빛으로 여기시켜 발생되기 때문에, Risø DTU 장비의 여기광원부에는 석영입자 측정용 Blue-LED (470 nm, FWHM 20 nm, Max. Power Density = $\sim 50 \text{ mW/cm}^2$)이외에, 870 nm (FWHM 40 nm)의 파장으로 시료를 여기시킬 수 있는 IR-LED가 설치되어 있다(Max. Power Density = $\sim 135 \text{ mW/cm}^2$; 그림 1). IR-LED (Light Emitting Diodes)로 여기시켜 발생한 K-장석 IRSL 신호는 검출기(Photomultiplier Tube) 앞에 설치된 Blue filter pack (4 mm Corning 7-59 + 2 mm Schott BG 39; Max. peak wavelength at $\sim 380 \text{ nm}$)을 이용하여, 청색파장 영역만을 선택적으로 연대측정에 이용한다.

3. K-장석 IRSL 신호의 특성

3.1 K-장석 IRSL 신호의 세기(IRSL sensitivity)

K-장석 IRSL 신호의 세기는 일반적으로 동일한 시료에서 분리된 석영, 즉 동일한 퇴적연대를 가지는 석영의 OSL 신호에 비해 훨씬 강하다. 그림 2에 신두리 해안사구에서 채취한 시료(시료번호 SDS14-1, 등가선량: 약 10 Gy)에서 분리한 K-장석 IRSL 신호와 석영 OSL 감쇠곡선을 도시하였다(K-장석의 분리과정은 “4.1. K-장석의 분리”에서 자세히 다루었다); 신호의 세기와 직접적인 관련은 없으나, 단일지수감쇠함수(single exponential decay function) 혹은 이들의 합으로 표현되는 석영 OSL 신호와는 달리, K-장석 IRSL 감쇠곡선은 “ $L = (1+Bt)^{-P}$ (L; IRSL 신호, B: initial charge population, $1 < P < 2$)”와 같은 멱함수(power function)로 표현됨은 주목할 만하다 (Bailiff and Barnett, 1994).

감쇠곡선측정에 사용된 K-장석과 석영입자들은 실험실조사(laboratory irradiation)를 하지 않은 자연시료(natural sample)로서 이론적으로는 동일한 연대를 지니고 있다. 이 감쇠곡선들은 일반적인 K-장석 IRSL 연대측정과 석영 OSL 연대측정에서 사용되는 측정조건에서 관찰되었다. 즉, IRSL 신호는 약 200개의 모래크기 K-장석입자(90-250 μm , mask size: 3 mm)를 320°C에서 60초 동안 열전처리한 후, IR LED를 이용하여 50°C의 온도에서 200초 동안 측정되었으며, OSL 신호는 약 2000개의 모래크기 석영입자(90-250 μm , mask size: 8 mm)를 260°C에서 10초 동안 열전처리한 후 470 nm 파장의 청색광원으로 125°C에서 40초 동안 측정되었다(편의상, 그림 2에는 40초까지의 IRSL 신호만을 도시하였다). 시료 SDS14-1에서 분리한 K-장석의 초기 IRSL 신호는 약 6400 cts/0.2s로서, 석영 OSL 초기신호 세기(약 400 cts/0.16s)에 비해 월등히(약 16배) 강하며, 측정된 K-장석과 석영입자의 개수를 고려하면, 동일한 양의 시료를 사용하였을 경우, IRSL 신호의 세기는 동일한 선량의 석영 OSL 신호에 비해 상당히 클 것임을 예상할 수 있다.

K-장석이 석영에 비해 월등히 여기광원에 민감하게 루미네선스를 방출하는 이유는 여러 가지가 있을 수 있다. 즉, 첫 번째, “2. 루미네선스 측정장비”에서 언급한 바와 같이 시료에 가해지는 IR LED의 power density가 청색광원보다 약 3배가 크기 때문에, IRSL 신호가 OSL 신호보다 더 효율적으로 방출되었을 가능성이 있다. 그러나, 방출되는 루미네선스 신호의 세기는 시료의 detrapping probability와 관

련이 있고(루미네선스 신호 $L(t)=n_0b\exp(-bt)$, n_0 : trap 된 전자들의 초기 개수, b : detrapping probability, t : 여기시간), 이는 다시 여기광원의 최대세기와 비례함을($b = \alpha I_0$, α : 광이온화단면적, I_0 : 여기광원의 최대세기) 감안하면, 여기광원의 최대 power density 차이(IR LEDs: Blue LEDs = ~ 3:1)만으로는 K-장석과 석영입자에서 방출되는 IRSL과 OSL 신호세기의 차이를 모두 설명할 수는 없을 것이다. 둘째, K-장석으로부터 방출되는 IRSL 신호의 source trap 및 루미네선스 센터(luminescence center)에 대해서 아직 확실하게 정의되어 있지 않지만(e.g., Li and Tso, 1997; Li *et al.*, 1997; Murray *et al.*, 2009; Jain and Ankjægaard, 2011; Li and Li, 2011b; Fu *et al.*, 2012), K-장석의 IRSL 신호와 관련된 trap들의 광이온화단면적이 석영에 비해 상당히 크거나, 활성화된 루미네선스 센터(radiative center)의 농도가 석영입자에 비해 많았을 가능성이 있다. 세 번째로는, 여기광에 반응하여 루미네선스를 방출시키는 K-장석입자의 절대량이 석영입자에 비해 많았기 때문일 수 있다(즉, light-sensitive한 입자의 수가 K-장석이 월등하게 많을 가능성). Duller *et al.* (2003)과 Li *et al.* (2011)은 다입자루미네선스 측정에 있어서, 석영에 비해 보다 많은 장석입자가 루미네선스 신호를 방출하는 것을 관찰하였고, Reimann *et al.* (2012)는 발트해 남부해변의 홀로세 퇴적층에 대한 단일입자 루미네선스 측정실험을 통해, 석영은 전체 입자의 약 5%, 장석의 경우는 약 20%의 입자가 여기광에 반응하여 연대측정에 사용할 만한 루미네선스 신호를 방출함을 보고하였다(그림 3).

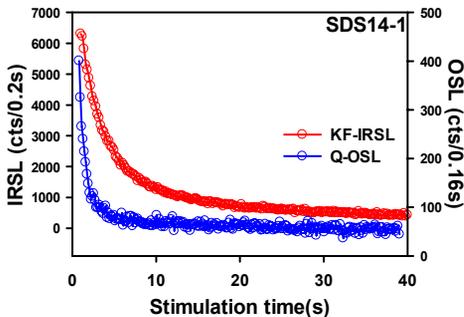


Fig. 2. Comparison of IRSL and OSL decay curves measured from K-feldspar and quartz aliquots with same mask size (~ 8 mm). The sample grains were recovered from coastal dune sands (Shindu-ri).

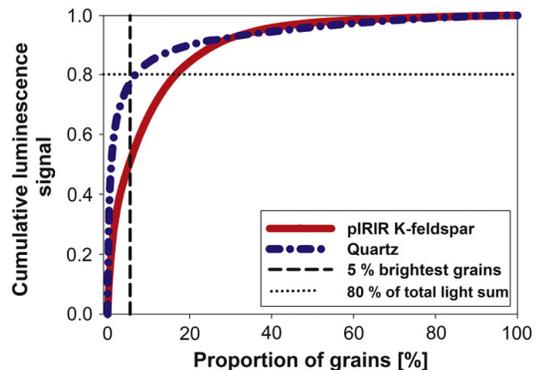


Fig. 3. Proportion of light-sensitive K-feldspar and quartz grains (from Reimann *et al.*, 2012).

빛에 민감한 K-장석 IRSL 신호특성은, 시료가 매우 젊어서(수년-수백년) 석영입자로부터 연대측정에 이용할 만큼 충분한 OSL 신호를 측정할 수 없거나, 퇴적물의 이동거리가 상대적으로 짧아 석영 OSL 신호가 충분히 민감화(sensitization)되지 않은 시료들의 연대측정에 있어서(Jeong and Choi, 2012), K-장석 IRSL 신호를 이용한 연대측정이 대안이 될 수 있음을 보여준다.

3.2 연대측정 가능상한의 연장

K-장석 IRSL 신호의 가장 큰 장점은, “1. 서언”에서 전술한 바와 같이, 석영 OSL 신호에 비해 연대측정 가능상한이 높다는 데에 있다. 단일시료재현법(Single-Aliquot Regenerative-Dose protocol, SAR protocol; Murray and Wintle, 2000, 2003)을 기반으로 한 루미네선스 연대측정법에서는 루미네선스 측정 시스템에 부착된 인공선원에서 시료에 가한 방사선량과 이로 인해 발생하는 루미네선스 신호의 상관관계를 정의하고, 이를 자연루미네선스 신호(natural luminescence signal)와 비교하여 등가선량(equivalent dose, D_e)을 결정한다. 단일시료재현법을 이용한 등가선량 결정은 Choi *et al.* (2004)에서 자세히 다루었다. 실험실 재현선량(regeneration dose)과 이로 인해 발생하는 루미네선스 신호와의 관계는 흔히 단일포화지수함수(single saturating exponential function)로 정의되는 성장곡선(growth curve)으로 나타난다(식 1, 그림 4(a)).

$$I = I_0(1 - \exp(-D/D_0)) \quad (\text{식 1})$$

식 1에서 I는 시료가 흡수한 방사선량에 따라 증가하는 루미네선스 신호의 세기, I_0 는 선량포화수준(dose saturation level), D는 시료의 등가선량, D_0 는 특성선량(characteristic dose)으로 단일포화지수함수의 곡률을 결정하는 요소가 된다. 예를 들어, 루미네선스 성장곡선으로부터 얻어진 등가선량이 특성선량값과 같다면(즉, $D=D_0$), 이 시료는 퇴적된 이후, 주변에서 방출되는 자연방사능에 노출되어, 사용가능한 격자결함이 약 63.2% 정도 포화되어 있다고 볼 수 있다. 시료의 자연루미네선스 신호의 세기가 포화수준에 가까워지면($I \rightarrow I_0$), 자연선량 측정에 약간의 오차(기기 및 통계오차)가 있어도 등가선

량값은 매우 큰 오차를 보여, 이로부터 계산된 연대 결과를 신뢰할 수 없게 된다. 그림 4(b)에 루미네선스 연대측정가능상한에 가까운 실제시료에 대한 실험결과를 도시하였다(정동진 하안단구시료). 이 시료의 루미네선스 성장곡선의 특성선량(D_0)은 79 Gy이고, 자연루미네선스 신호를 이 성장곡선에 내삽하여 얻은 등가선량(D_e)은 229 Gy이었다. 따라서, 식 1로부터 $I = 0.945 \times I_0$ 의 관계가 성립하여, I가 선량포화수준(I_0)에 매우 가까워 짐을 알 수 있다. 이 경우, 자연루미네선스 측정오차가 3.3%(1 σ 표준오차)에 불과하지만, 이로 인해 야기되는 등가선량의 오차범위는 193-298 Gy에 달하게 된다. 일반적으로 루미네선스 연대측정에 있어서, 성장곡선으로부터 얻은 등가선량이 특성선량의 두 배가 넘는 경우(즉,

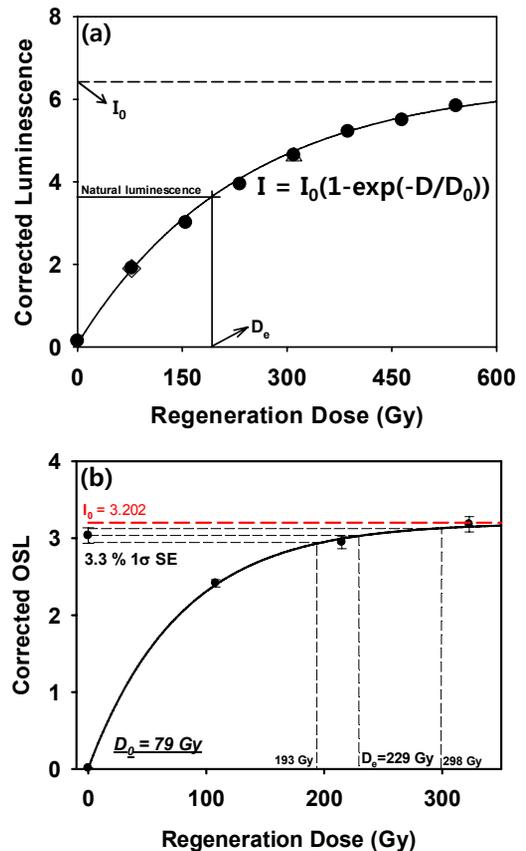


Fig. 4. (a) SAR-based dose response growth curve of luminescence signals (b) In case that the natural luminescence is close to dose saturation level ($I \rightarrow I_0$), the resultant D_e values are far less precisely determined with large uncertainties.

$D > 2D_0$ 일 때, 86.4% 이상의 포화상태), 측정된 등가 선량값과 이로부터 얻어진 연대결과는 신중하게 해석되어야 하는 것으로 받아들여지고 있다(Wintle and Murray, 2006).

그림 5에 올진 노음리지역 단구퇴적층(시료번호 1004NE-4)에서 분리한 K-장석 IRSL 신호와 석영 OSL 신호의 성장곡선을 비교·도시하였다. 이 시료에서 K-장석 IRSL 신호와 석영 OSL 신호의 특성선량값(D_0 value)은 각각 256 Gy와 115 Gy이다. 따라서, 연간선량을 $3 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ 로 가정할 경우, 석영 OSL 신호로는 약 76 ka ($2 \times 115 \div 3$)까지의 연대만을 측정할 수 있는 반면, K-장석으로는 약 170 ka까지 연대 측정이 가능하게 된다. 실제로, 시료 1004NE-4에서 분리한 석영과 K-장석의 자연 OSL 및 IRSL 신호는 모두 약 1.8이었고(그림 5 y축의 다이아몬드 심볼), 이는 석영 OSL 신호의 성장곡선의 포화수준보다 큰 값으로서(그림 5의 청색선), 이 퇴적층은 석영을 이용한 OSL 연대측정이 불가능함을 보여준다. 반면에, 자연 IRSL 신호를 K-장석 IRSL 성장곡선위에 내삽하여 319 Gy의 등가선량, 즉 anomalous fading 현상을 무시한다면 약 106 ka (연간선량을 $3 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ 로 가정)의 퇴적연대를 구할 수 있다.

3.3 석영 OSL 신호오염의 영향

앞서 언급한 두 가지의 K-장석 IRSL 신호특성 이외에도 IRSL 신호를 이용한 연대측정에서는 시료전처리 과정(장석분리과정)에서 잔존하는 석영입자와 이로 인한 OSL 신호의 영향을 무시할 수 있다는 점

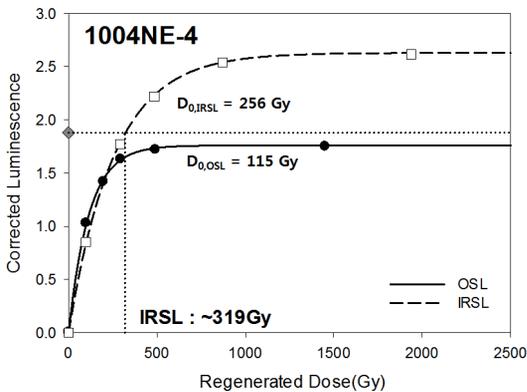


Fig. 5. Dose response growth curves of K-feldspar IRSL signal and quartz OSL signal. The sample grains were recovered from fluvial terrace sediments in Uljin area.

도 연대측정 측면에서 유리한 또 하나의 IRSL 신호 특성이라 할 수 있다. 지금까지 알려진 바로는 적외선으로 여기시킬 경우, 120°C 이상의 적외선여기조건을 제외하고는(Jain *et al.*, 2005), 석영입자로부터 루미네선스 신호가 거의 방출되지 않는 것으로 알려져 있다(Short and Huntley, 1992). 따라서, 만일 시료전처리 과정에서 석영이 완전히 분리·제거되지 않더라도 적외선여기로 방출되는 IRSL 신호를 측정하면, 잔존하는 석영여부에 큰 관계없이 K-장석입자에서 기원하는 신호만을 측정하게 되고, 두 광물간의 특성차이로 인한 루미네선스 신호의 간섭은 발생하지 않게 된다.

3.4 Anomalous fading과 IRSL 연대보정

K-장석 IRSL 신호의 비정상적인 감쇠현상(anomalous fading 혹은 athermal fading)은 열이나 빛과 같은 외부에너지의 흡수 없이도, 시간이 지남에 따라 K-장석내의 IRSL 신호(latent IRSL signal)가 자연적으로 감소하는 현상을 의미한다. 따라서, K-장석을 이용한 퇴적물의 IRSL 연대측정시 anomalous fading 현상을 고려하지 않으면, IRSL 연대측정결과는 실제 퇴적연대를 “과소평가”하는 원인이 된다(e.g., Wallinga *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008; Reimann *et al.*, 2011; Buylaert *et al.*, 2012).

Anomalous fading 현상은 Wintle (1973)이 화산암 내 장석입자의 TL 신호에서 처음 관찰하였고, 1980-90 년대를 거치면서 K-장석 IRSL 신호의 anomalous fading을 설명하기 위한 여러 가지 모델들이 제시되

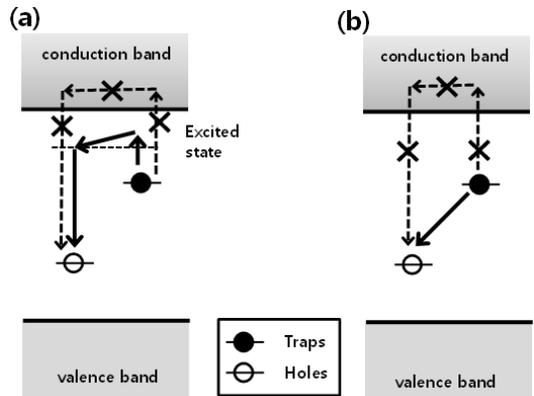


Fig. 6. (a) The localized transition model (redrawn from Templer (1986)), (b) Quantum tunneling effect (redrawn from Visocekas (1985)).

었다. 이 중, Templer (1986)의 국부적 전이모델(The localized transition model; 그림 6(a))과 Visocekas (1985, 1993)의 양자터널효과(Quantum or wave-mechanical tunneling effect; 그림 6(b))가 anomalous fading을 설명하는 대표적 모델이라 할 수 있는데, 국부적 전이모델에서는 물리적으로 가까운 거리에 있는 trap과 루미네선스 센터(luminescence center)가 동일한 excited state를 공유하며, trap에서 방출된 전자는 excited state를 거쳐 루미네선스 센터와 결합하는 과정을 상정한다; trap과 루미네선스 센터는 결정 내에 존재하는 특정한 defect를 의미하며, 루미네선스 신호는 전자들이 trap에서 방출되어 루미네선스 센터와 결합하면서 발생한다. Trap과 루미네선스 센터에 대한 내용은 Aitken (1998)의 “1. Basic notions: luminescence”에 상세히 설명되어 있다. 하지만, 국부적 전이모델은 주로 저어콘에서 방출되는 TL신호의 anomalous fading 현상을 설명하기 위해 제안된 것으로, 최근 K-장석 anomalous fading의 현상은 양자터널효과에 의한 것으로 가장 잘 이해되고 있다. Spooner (1994)는 루미네선스 특성이 잘 정의되어 있는 24개의 장석시료들을 사용하여, 이들로부터 방출되는 IRSL 신호의 fading rate와 보관온도(sample storage temperature)의 비례관계가 상당히 미약함을 관찰하였고, 이와 같은 미약한 열의존성(thermal dependence)을 바탕으로 IRSL 신호에서 관찰되는 anomalous fading이 국부적 전이모델보다는 양자터널효과를 따르고 있다고 주장하였다. 만일, Spooner (1994)의 관찰결과와는 달리 IRSL 신호의 감소가 보관온도와 밀접하게 관련되어 있다면, 이는 열에너지에 의한 전자들의 excited state로의 상태변화(thermally assisted transition of electrons into excited states)가 있었음을 뒷받침하여, 국부적전이현상이 IRSL 신호 anomalous fading의 주된 원인임을 간접적으로 지지하는 증거가 되었을 것이다. 양자터널효과에서는 국부적 전이모델과는 달리 trap의 전자들이 conduction band (혹은 conduction band 바로 아래의 band-tail states)까지 도달하기에 필요한 외부 에너지의 흡수없이도, 루미네선스 센터와 결합하는 경로를 anomalous fading의 기본 프로세스로 가정하고 있다.

양자터널모델에 의하면, trap된 전자들(trapped

electrons)의 감소경향은 지수함수를 따르며(Visocekas, 1985), 이를 바탕으로 Huntley and Lamothe (2001)는 K-장석 IRSL 연대측정에 있어서 anomalous fading에 의해 과소평가된 루미네선스 연대를 보정하기 위한 수학적 방법을 제안하였다. 이에 따르면, 양자터널효과에 의한 K-장석 IRSL 신호의 anomalous fading은 다음과 같이 표현된다(식 2).

$$I = I_c \left[1 - \frac{g}{100} \log_{10} \left(\frac{t}{t_c} \right) \right] \quad (\text{식 2})$$

여기에서, I와 I_c 는 시료에 임의의 방사선을 가한 후, 각각 t와 t_c 시간동안 보관하여 측정된 IRSL 신호의 세기(intensity), g는 시간의 상용로그값에 대한 신호의 감소정도, 즉, 10배의 시간이 지났을 때 감소한 IRSL 신호비율을 의미하는 것으로 통상 이 값을 fading rate라 표현한다. 예를 들어, 실험실에서 일정량의 방사선을 시료에 조사하고, 480시간을 상온에서 보관한 후($t=480$) 측정된 IRSL 신호(I)가, 48시간동안 보관한 후($t_c=48$) 측정된 IRSL 신호(I_c)의 95%라면, 다음의 풀이에서와 같이 5%의 g-값(g-value)을 얻게 된다.

$$0.95 = 1 - \frac{g}{100} \log_{10} \left(\frac{480}{48} \right) \quad (\text{식 3})$$

g-값은 통상적으로 “%/decade”의 단위를 사용하는데, 이는 위의 예에서와 같이 48시간과 480시간 사이의 fading rate가 5%였다면, 1년에서 10년 사이, 혹은 100년에서 1000년 사이의 fading rate(g-값)도 5%임을 의미한다. (식 2)에 있어서 한 가지 주목할 만한 것은, g-값의 계산 시, t_c 를 어떻게 결정하는지에 따라 g-값에 약간의 차이가 있기 때문에, 대부분의 문헌에서는 t_c 를 2일(48시간)로 보정하여 g-값을 보고하고 있다(e.g., $g_{2\text{days}} = 3.39 \pm 0.11\% / \text{decade}$, 그림 7(a); Buylaert *et al.*, 2008). Anomalous fading 보정을 위한 실험절차 및 계산법은 Aitken (1998, Appendix D), Huntley and Lamothe (2001)과 Auclair *et al.* (2003)에 자세히 소개되어 있다. 실례로, anomalous fading 현상을 보정하지 않았을 경우 18 ± 1 ka의 연대를 보이는 시료는, $g_{2\text{days}} = 3.0 \pm 0.9\% / \text{decade}$ 의 fading rate를 고려하였을 때, 24 ± 3 ka의 보정된

IRSL 연대를 얻게 된다(그림 7(b)).

3.5 Non- or less fading IRSL 신호

앞절에서 소개한 바와 같이, anomalous fading 현상을 보정하여 K-장석 IRSL 연대측정의 신뢰도를 높이기 위한 여러 시도들이 진행되고 있으나, 아직까지도 일반적으로 적용될 수 있는 보정법은 제시되고 있지 않다. 예를 들어, Huntley and Lamothe (2001) 와 Auclair *et al.* (2003)에서 소개된 보정법은, 이론적으로 포화지수함수로 표현되는 IRSL 신호 성장곡선의 직선부분, 즉 방사선량과 IRSL 신호의 세기가 선형적인 관계를 보이는 짧은 연대의 시료에만 적용이 가능하며, Auclair *et al.* (2003)이 그들의 연구에서 스스로 인정한 바와 같이, 짧은 시간동안 실험실

에서 이루어지는 fading 실험에서 도출되는 신호의 감소정도는 수 % 정도이기 때문에, 실험과정동안 생길 수 있는 측정오차(measurement error)와 구별하기 쉽지 않다. 즉, 실험적으로 얻어진 g-값의 재현성(reproducibility)이 극히 낮다는 단점이 있다(e.g., 그림 7(b)). 또한, 보다 오래된 시료(즉, D_e 가 포화지수함수의 곡선부에서 정의되는 시료)에 대한 fading rate 보정을 위해서 Lamothe *et al.* (2003)은 Dose Rate Correction (DRC)법을 제안하였으나, 이 역시 기존의 보정법과 마찬가지로 g-값의 재현성이 양호하지 않았다(Auclair *et al.*, 2007). 따라서, 보정된 IRSL 연대결과는, 독립적으로 제공되는 연대결과(independent age control)와의 비교작업에 의해서만 그 신뢰성이 담보되는 경우가 많았다.

K-장석의 anomalous fading 현상과 이로 인한 연대측정 결과의 오류를 원천적으로 극복하기 위하여, fading 현상이 전혀 없거나, 혹은 fading 현상이 연대결과에 영향을 미치지 않을 만큼 미미한 IRSL 신호요소를 찾아내는 것이 최근 루미네선스 연대측정 연구자들의 주된 연구주제 중 하나로 대두되고 있다. Thomsen *et al.* (2008)은 다양한 여기조건과 검출조건을 조합을 적용하여 K-장석 IRSL 신호의 fading rate 변화를 연구하였다. 저자들은 이 연구에서 K-장석 IRSL 신호의 fading rate가 측정온도가 높을수록 감소하는 것을 실험적으로 확인하였으며(그림 8), 시도된 여러 조합 중, [250°C 열전처리(60 초) → IRSL (readout T = 50°C) → IRSL (readout T

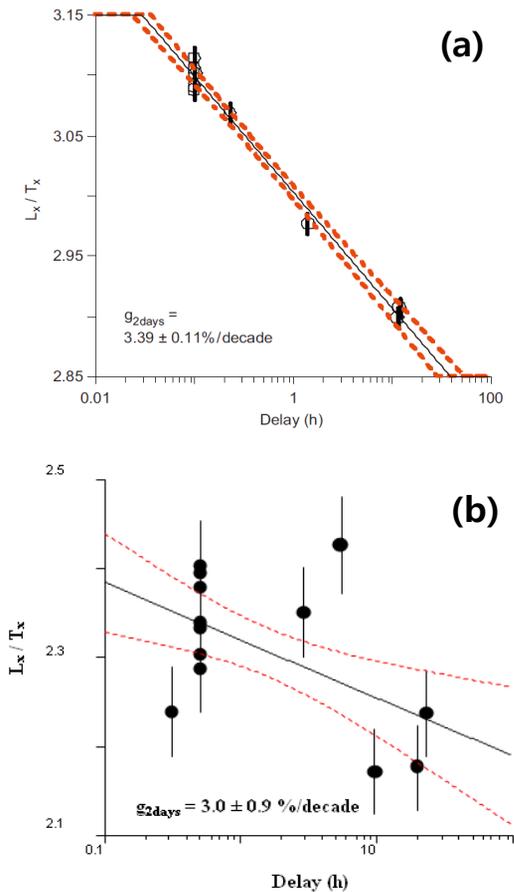


Fig. 7. Derivation of fading rates with relative uncertainties of ~3% (a) and ~30% (b), both of which are expressed as “%/decade”.

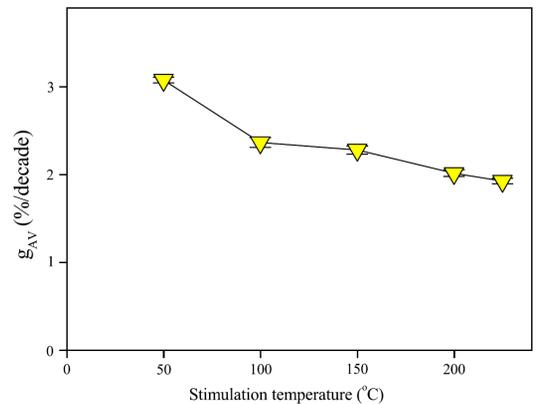


Fig. 8. The dependence of fading rate in K-feldspar IRSL signals on stimulation temperatures (modified from Thomsen *et al.*, 2008).

= 225°C)]의 과정을 통하여 얻어진 225°C에서 측정된 IRSL 신호가 가장 낮은 약 1-3%/decade 내외의 fading rate를 보임을 보고하였다(blue filter pack으로 검출, “2절. 루미네선스 측정장비 참조); 일반적으로 K-장석 IRSL 신호라 함은 50°C에서 측정하여 검출한 IRSL 신호를 의미하며, 위와 같이 50°C에서 IRSL을 한번 측정 후, 더 높은 온도에서 측정된 IRSL 신호를 post IR-IRSL 신호라 한다. 지금까지 보고된 post IR-IRSL 신호는 225°C 뿐만 아니라, 이 보다 높은 여러 온도에서 측정되고 있기 때문에, 문헌에서는 post IR-IRSL의 측정온도를 아래첨자로 표시하는 경우가 많다(e.g., 225°C에서 post IR-IRSL 신호를 측정했을 경우, post IR-IRSL₂₂₅ 혹은 pIR-IRSL₂₂₅ 등으로 표기한다. 이 논문에서도 이와 같은 표기법을 따른다).

2009년 Murray *et al.* (2009)는 실험적 연구를 통해 post IR-IRSL 신호의 source trap이 400°C 이상의 K-장석 TL 피크와 관련이 있음을 관찰하였고, 연대측정을 목적으로 하는 실험에서는 300°C 이상의 열전처리 온도와 290°C에서의 post IR-IRSL (즉, post IR-IRSL₂₉₀) 신호측정이 바람직하다고 제안하였다. Buylaert *et al.* (2009)는 시료를 [320°C 열전처리(60 초) → IRSL (readout T = 50°C)] 로 처리한 이후, 측정온도를 290°C로 증가시켜 얻은 post IR-IRSL (즉, post IR-IRSL₂₉₀) 신호의 fading 현상이 약 1%/decade 미만으로 매우 미약함을 관찰하였으며(그림 9), Thiel *et al.* (2012)은 매우 오래된 퇴적층에서 Murray *et al.* (2009)이 제안한 post IR-IRSL₂₉₀신호

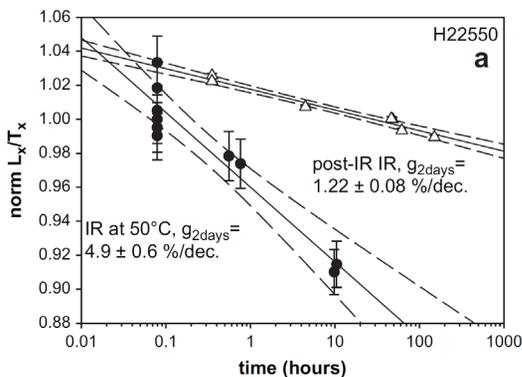


Fig. 9. Comparison of fading rates measured using IRSL and post IR-IRSL₂₉₀ signals in K-feldspar (modified from Buylaert *et al.* (2009)).

가 포화상태에 이르러 있음을 최초로 관찰하였다. K-장석 IRSL 신호는 아무리 오래된 퇴적층이라 할 지라도, anomalous fading 현상으로 인해 절대로 포화상태에 있을 수 없음을 감안하면, Thiel *et al.* (2012)의 연구는 post IR-IRSL₂₉₀ 신호가 anomalous fading의 영향을 거의 받지 않는 안정적인 신호라는 것을 강력하게 뒷받침하고 있다. 2009년 이후에 이루어진 이러한 일련의 연구결과를 바탕으로 최근 K-장석을 이용한 많은 논문에서 post IR-IRSL₂₉₀신호를 연대측정에 성공적으로 적용한 사례가 증가하고 있다(e.g., Kars *et al.*, 2012; Thiel *et al.*, 2012). post IR-IRSL₂₉₀ 신호는 IRSL 신호에 비해 상대적으로 빛에 둔감하여, 기존의 pIR-IRSL₂₉₀ 신호가 퇴적과 함께 거의 완벽하게 제거되기 위해서는 수 시간동안 빛에 노출되어야 한다는 단점이 있으나(그림 10), 약 200 ka 이상의 오래된 퇴적층의 연대측정에 주된 유용성이 있고, 루미네선스 연대측정결과의 일반적인 불확도가 약 10% 내외(1σ 표준오차) 임을 감안하면, 퇴적당시 incomplete bleaching으로 인한 연대의 과대평가 정도는 연대결과의 지질학적/지형학적 해석에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다(퇴적과정을 통한 루미네선스 신호의 bleaching과 연대 측정학적 의미는 Choi *et al.* (2004)의 “2.1.3절” 참조).

이 외에도 Li and Li (2011a)는 Thomsen *et al.* (2008)이 제안한 것과는 달리, 일반적인 조건에서(즉, 50°C에서) 첫 IRSL 신호를 측정 후, 단계적으로 온도를 높혀가면서 여러번의 IRSL 신호를 측정하는 “multi-elevated temperature post IR-IRSL (이하, MET-post

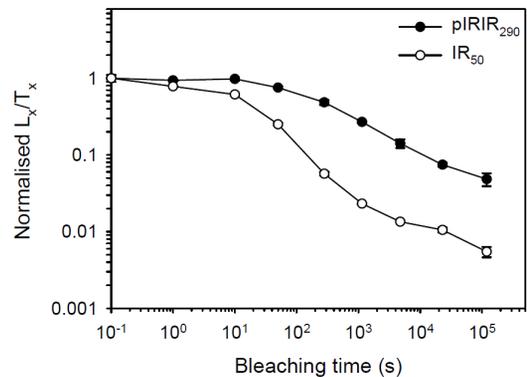


Fig. 10. Bleaching of pIR-IRSL₂₉₀ and IRSL signals in K-feldspar when exposed to UV light Buylaert *et al.* (in press).

IR-IRSL)“ 연대측정법을 제안하기도 하였다. 이 MET-post IR-IRSL 연대측정법 또한, anomalous fading 효과가 가장 적은 IRSL 신호 요소를 찾아 별도의 fading 보정작업 없이 연대를 도출하는 유용한 방법 이기는 하지만, post IR-IRSL 신호의 유래에 대해 기존의 연구와는 다른 입장을 보이고 있다; 즉, MET-post IR-IRSL 연대측정에서는 IRSL 신호가 multiple trap에서 유래함을 기본 가정으로 하지만, Thomsen *et al.* (2008)과 Murray *et al.* (2009) 등에서는 single trap을 상정하고 있다(이에 대한 자세한 내용은 Li and Li (2011a)와 이후 Thomsen *et al.* (2012), Li and Li (2012)에서 이루어진 논의들을 참고).

4. K-장석 IRSL 연대측정

K-장석을 이용한 IRSL 연대측정 결과는 석영 OSL 연대측정과 마찬가지로 K-장석이 퇴적된 이후, 즉, 햇빛으로부터 차단된 이후 축적한 총 자연방사선량(등가선량(D_e), equivalent dose, Gy)과 K-장석입자가 주변의 광물(+ 내부의 방사성 동위원소)로부터 방출되는 자연방사선 및 우주선(cosmic ray)에 노출되어 단위시간당 흡수하는 방사선량(연간선량, dose rate, Gy/ka 혹은 mGy/a)을 바탕으로 구할 수 있다(식 4).

$$\text{IRSL 연대}(ka) = \frac{\text{K-장석의 등가선량(Gy)}}{\text{연간선량(Gy/ka)}} \quad (\text{식 4})$$

(여기에서, 연간선량은

내부연간선량과 외부연간선량의 합)

그러나, K-장석으로부터 방출되는 IRSL 신호의 특성은 석영 OSL 신호와 상이할 뿐만 아니라, “3.4 절 Anomalous fading과 IRSL 연대보정”에서 언급한 바와 같이 anomalous fading 현상이 관찰되므로 등가선량추정을 위한 실험조건이 석영 OSL 신호를 측정할 때와는 어느 정도 차이가 있다. 또한, 연간선량 추정에 있어서도 K-장석외부에서 단위시간당 흡수하는 외부연간선량(external dose rate) 뿐만 아니라, K-장석입자내부에 포함된 방사성동위원소 ^{40}K 에서 방출되는 β 와 γ 선의 영향(internal dose rate)도 고려해야 하기 때문에 석영 OSL 연대측정의 경우보다는 더욱 세심한 주의를 기울일 필요가 있다.

이에 대해서는 “4.2-4.3 절”에 걸쳐 자세히 다루었다.

4.1 K-장석의 분리

퇴적물 시료로부터 K-장석을 분리하는 실험절차는 다음과 같다.

① 퇴적물 시료를 일정한 입도구간으로 습식 체질한다(e.g., 90-180 μm , 180-212 μm 등)

② 체질을 통하여 회수된 시료를 10% HCl (약 1시간)과 10% H_2O_2 (1시간-24시간)로 처리하여 탄산염광물과 유기물을 제거한다.

③ 이 후 비중액(Sodium Polytungstate, Liquid form)을 이용하여 석영을 포함하는 비중구간($\rho > 2.62 \text{ g/cm}^3$)과 K-장석을 포함하는 비중구간($\rho < 2.58 \text{ g/cm}^3$)을 분리한다.

④ 비중이 2.62 g/cm^3 보다 큰 구간의 시료들을 40% HF로 45분-1시간 정도 에칭하여, 석영입자를 추출하고, 석영 OSL 연대측정이 필요한 경우 사용한다(퇴적물로부터 석영입자의 분리방법은 Choi *et al.* (2004, Appendix)에서 자세히 다루었다)

⑤ 비중이 2.58 g/cm^3 보다 작은 시료들은 10% HF로 약 40분간 처리하여, K-장석이외의 광물을 용해시키고, K-장석이 퇴적된 이후 주변 광물로부터 흡수한 방사선 중 α -particle에 영향을 받은 바깥부분을 제거한다.

⑥ 마지막으로 10% HCl로 약 20분간 처리하여 HF처리과정 중 생성될 수 있는 불화염 광물(fluoride minerals)을 제거한다.

위의 분리과정을 통하여 추출된 장석입자들의 양이온 비율(K, Na, Ca 비율)을 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microprobe)과 에너지분광검출기(EDS, Energy Dispersive Spectroscopy)를 사용하여 측정하였다(그림 11; 이 자료는 Sohbaty *et al.* (in press)에 사용된 포르투갈 하성퇴적물 시료로부터 얻어졌다). 측정결과, 비중이 2.58 g/cm^3 보다 작은 구간의 입자들은 대부분 Na- 혹은 K-장석이였으며, 이중 41개(분석된 입자의 85.4%) 입자에서 K이 양이온의 ~ 60% 이상을 차지하였다. 이는 제시된 분리과정을 통하여 K-장석을 효과적으로 분리할 수 있음을 지시한다.

4.2 등가선량 측정(equivalent dose estimation)

최근 행해지고 있는 K-장석 IRSL 연대측정을 위한

Table 1. Measurement protocols for K-feldspar D_e estimation using (A) IRSL and (B) pIR-IRSL₂₉₀ signals.

Protocol (A)			Protocol (B)		
Step	Treatment		Step	Treatment	
1	regeneration dose ^a		1	regeneration dose ^a	
2	preheat (at 250°C for 60 s)		2	preheat (at 320°C for 60 s)	
3	IRSL (at 50°C for 200 s)	$L_{i,IR50}$	3	IRSL (at 50°C for 200 s)	
4	test dose		4	IRSL (at 290°C for 200 s)	$L_{i,pIR290}$
5	preheat (at 250°C for 60 s)		5	test dose	
6	IRSL (at 50°C for 200 s)	$T_{i,IR50}$	6	preheat (at 320°C for 60 s)	
7	return to step 1		7	IRSL (at 50°C for 200 s)	
			8	IRSL (at 290°C for 200 s)	$T_{i,pIR290}$
			9	IRSL (at 325°C for 200 s)	
			10	return to step 1	

^a For natural samples, no irradiation is administered.

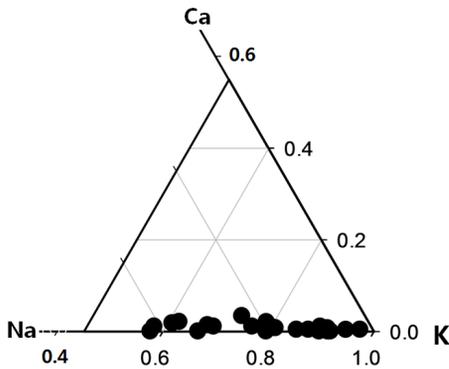


Fig. 11. Elemental concentration of K, Na and Ca in K-feldspar extracts from fluvial samples from Portugal (modified from Sohbaty *et al.*, *in press*).

등가선량 추정은 기본적으로 Murray and Wintle (2000)이 석영 OSL 연대측정을 위해 제안한 단일시료재현법을 바탕으로 하고 있다(Wallinga *et al.*, 2000). K-장석입자의 등가선량추정을 위하여 일반적으로 가장 흔히 적용되어 온 단일시료재현법 실험과정은 표 1의 Protocol (A)와 같다(Lamothe *et al.*, 2001; Huot and Lamothe, 2003, 단일시료재현법의 일반적인 사항은 Choi *et al.* (2004)의 “2.2.2절” 참조). 즉, 자연시료(시료전처리 후, 열전처리와 방사선조사를 하지 않은 K-장석)를 250°C에서 60초 동안 가열한 후, 50°C에서 200초 동안 IRSL 신호를 측정한다. 측정된 IRSL 신호 중 초기 4초 동안 측정된 신호에서 마지막 20초 동안 측정된 신호(배경치)를 뺀 후, 이를 $L_{i,IR50}$ 이라 한다. 이 실험과정 동안 일어났을 수 있는 K-장석입자의 민감도변화를 보정하기 위하여,

일정량의 시험방사선(test dose)을 조사한 후, [열전처리→IRSL 측정] 과정을 반복하여 $T_{i,IR50}$ 을 구한다. 이 같은 절차를 거쳐 얻어진 $L_{i,IR50}$ 을 $T_{i,IR50}$ 로 나누어 x-y 평면상의 y-축에 도시하고, 이를 보정 자연루미네선스(corrected natural luminescence, $R_{i,IR50}$)라 한다. 이 후, 일련의 재현선량(regeneration dose)을 K-장석에 가하면서, 위의 과정을 반복하면, 선량에 따른 IRSL 신호의 성장곡선을 얻게 되고, 이 성장곡선 위에 최초로 얻어진 자연루미네선스 값을 내삽하여 등가선량을 구한다(그림 12, 검은 실선).

Post IR-IRSL₂₉₀을 이용한 등가선량 추정은 열전처리를 320°C에서 60초 동안 실시하며, 50°C에서 IR과장으로 시료를 여기시킨 후, 다시 290°C에서 200초 동안 IRSL 신호를 측정하여 이루어진다(Thiel *et al.*, 2011a; Buylaert *et al.*, 2012; 표 1, Protocol (B); 그림 12, 회색실선). 단일시료재현법에서는 루미네선스 신호 측정과정 동안, 모든 재현선량(혹은 자연선량)에 의한 루미네선스 신호가 완벽하게 제거되는 것을 기본 전제로 한다. 하지만, post IR-IRSL₂₉₀ 신호는 “3.1절 K-장석 IRSL 신호의 세기”에서 간단히 언급한 바와 같이, 측정과정동안 신호가 완벽하게 제거되지 않을 가능성이 있기 때문에, post IR-IRSL₂₉₀ 신호를 측정할 이후, 보다 높은 온도(325°C)에서 200초 동안 다시 한번 IR 광원으로 여기하여 잔존 루미네선스 신호를 제거한다(표 1, Protocol (B)의 step 9).

4.3 연간선량 측정(dose rate estimation)

K-장석 IRSL 연대측정을 위한 연간선량은 K-장

석 주변의 광물로부터 방출되는 자연방사선에서 기인한 외부 연간선량(external dose rate) 뿐만 아니라, K-장석 내부의 ^{40}K , ^{87}Rb 과 같은 방사성동위원소의 붕괴로 인한 방사선, 즉 내부 연간선량(internal dose rate or intrinsic dose rate)을 함께 고려해야 한다(외부연간선량 측정에 관한 자세한 사항은 Choi *et al.* (2004)의 2.3.절을 참조). 대체적으로 K-장석의 내부 연간선량은 외부 연간선량의 30% 정도를 차지하기 때문에, K-장석 내부의 K과 Rb의 함량을 정확히 측정할 필요가 있다. 하지만, 동일한 지점에서 채취한 K-장석 입자들도 각 입자마다 이들 원소의 함량이 서로 다를 수 있고, 단일입자를 사용하는 경우를 제외하고는, 일반적으로 수 백-수 천개의 다입자를 대상으로 하여 연대측정이 이루어지기 때문에, 각 시료들(즉, 각 시료채취 파이프에서 분리된 K-장석)의 평균적 원소함량을 사용하는 경우가 많다.

Huntley and Baril (1997)은 K-장석 IRSL 연대계산 시, K 함량을 $12.5 \pm 0.5\%$ 로 가정할 것을 제안하였고, Huntley and Hancock (2001)은 K-장석 내의 평균적인 Rb 함량을 400 ± 100 ppm으로 제시하였다. 이 두 결과는 이들 연구보다 10여년전에 이미 Mejdahl (1987)이 25개의 시료를 NAA (Neutron Activation

Analysis)로 분석하여 제시한 K과 Rb 함량의 상관관계에 대한 경험식(식 5)이 오차범위 내에서 유효함을 잘 보여준다.

$$\text{Rb (ppm)} = -9.17 + 38.13 \text{ K (\%)} \quad (\text{식 5})$$

하지만, 실제 K-장석 IRSL 연대측정에 있어서, 모든 시료의 K 함량을 12.5%로 가정하는 것은, 경우에 따라, 특히, 외부연간선량이 낮은 환경에서는 연대 측정 결과에 무시하지 못할 만큼의 영향을 줄 수도 있다. 예를 들어, 울릉도 테프라층의 경우("5.4절 화산쇄설성 퇴적물 및 테프라층" 참조) 평균입도가 $215 \mu\text{m}$ ($180\text{-}250 \mu\text{m}$)인 K-장석내의 K 함량은 약 4.0-7.4%의 변화폭을 보이는데, 이들의 등가선량과 외부연간선량을 각각 20 Gy와 1.0 Gy/ka로 가정하면, 13-16 ka의 연대가 산출된다. 이는, 이들 시료의 K-함량을 단순히 12.5%로 가정하는 경우(이 경우, 계산되는 IRSL 연대는 11 ka이다), 약 20-32% 정도 과소평가된 IRSL 연대를 얻게 됨을 의미한다.

한편, K-장석내부의 K과 Rb 함량은 K-장석의 입자크기와 비례관계에 있다. 즉, IRSL 연대측정에 사용되는 K-장석 입자의 크기가 커지면, 입자 내에 포함된 방사성동위원소 ^{40}K 과 ^{87}Rb 의 함량도 높아지게 되고, 따라서 K-장석이 퇴적된 이후 자체적으로 흡수한 연간선량(내부연간선량)도 작은 크기의 입자보다 커지게 된다. Mejdahl (1987)과 Readhead (2002)는 K-장석의 크기에 따른 ^{40}K 과 ^{87}Rb 의 함량과 이들의 방사성붕괴로 인한 선량흡수율(absorbed dose fraction)의 관계를 제시하였다. 이들의 관계식에 따라 K-장석의 크기와 내부연간선량의 상관관계를 그림 13에 도시하였다(이 그림에서 Rb 함량은 식 5에 따라 K 함량으로부터 유도되었다). 이 그림에서 ^{87}Rb 의 베타붕괴로 인한 내부연간선량은 ^{40}K 에 비해 매우 적은 것은 주목할 만하다. 일반적으로 연대측정에 사용되는 모래크기($90\text{-}250 \mu\text{m}$)의 K-장석의 경우, ^{87}Rb 의 붕괴로 인한 내부연간선량은 전체 내부연간선량의 10% 내외에 불과함을 알 수 있다. 즉, K-장석의 내부연간선량 계산에 있어 정확한 K 함량 결정이 무엇보다도 중요함을 잘 보여준다. 최근 한국기초과학지원연구원(KBSI)과 Risø DTU는 기존의 루미네선스 측정시스템에 mini-XRF를 장착하여, 등가선량 측정에 이용한 K-장석입자들로부터 K 함량을 직접 측정

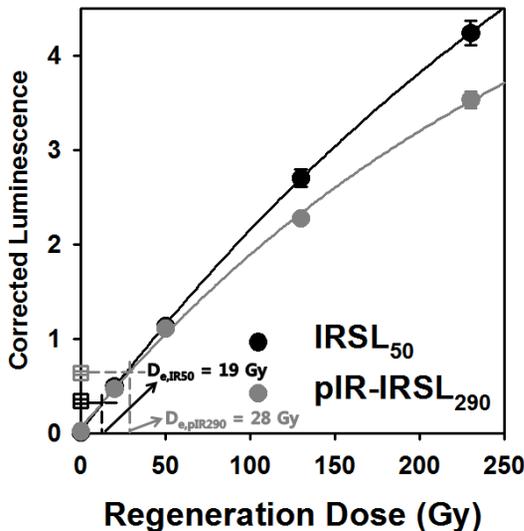


Fig. 12. D_e estimation using SAR (Single Aliquot Regenerative-Dose protocol)-based dose response growth curves of K-feldspar IRSL₅₀ and pIR-IRSL₂₉₀ signals (modified from Choi *et al.*, in preparation). $D_{e,IR50}$ is lower than $D_{e,pIR290}$ by about 10 Gy, due to anomalous fading.

할 수 있는 시스템을 공동으로 제작하고, 후속연구를 수행중이다(Kook *et al.*, 2012; 그림 14). 이러한 장치개발을 통하여, 향후 내부연간선량 추정치의 신뢰도 향상을 위한 의미있는 진전이 있을 것으로 기대된다.

K-장석내의 U과 Th으로 인한 내부연간선량에 대한 연구 역시 다양하게 진행되어 왔다. Mejdahl (1987)은 스칸디나비아 지역의 K-장석을 이용하여 U과 Th의 방사성붕괴로 인한 내부연간선량을 0.10 ± 0.05 Gy/ka로 계산하고, K에 의한 영향과 비교하면 U과 Th이 내부연간선량에 끼치는 영향이 무시할 만하다고 주장하였다. 하지만, 이 후 중국 퇴적층의 K-장석을 대상으로 한 Zhao and Li (2005)의 결과는 212-250 μm 크기의 K-장석입자에서 U과 Th에 의한 내부연간선량이 전체 내부연간선량의 최대 24%를 차지하며, 내부연간선량 추정에 있어 K 외에 U와 Th의 영향도 무시할 수 없다고 주장하였다. 그럼에도 불구하고, 최근 이루어지고 있는 다양한 K-장석 IRSL 연대측정에서는 U과 Th으로 인한 내부연간선량을 고려하지 않는 것이 일반적이며, 이들의 영향을 무시하더라도 여타 다른 독립적인 연대결과와 일치하는

결과들이 산출되고 있는 것으로 볼 때, 특별한 경우(외부연간선량이 매우 낮은 시료)를 제외하고는 U과 Th에 의한 내부연간선량이 큰 비중을 차지하지 않는 것으로 판단된다.

5. 국내외의 K-장석 IRSL 연대측정 적용사례

5.1 간석지(Tidal flat) 퇴적층

국내에서는 Hong *et al.* (2003)에 의해 이루어진 한반도 서해안에 분포하는 간석지 퇴적층에 대한 연대측정 연구를 최초의 K-장석 IRSL 연대측정법 적용사례로 들 수 있다. 이들이 연구대상으로 삼았던 간석지 퇴적층의 경우, 퇴적연대가 1 ka를 넘지 않을 것으로 판단되어, 석영에 비해 빛에 대한 민감도가 월등한 K-장석 IRSL 신호를 이용하여 연대측정을 시도한 것으로 생각된다(“3.1절 K-장석 IRSL 신호의 세기” 참조).

이들은 간석지 표면으로부터 깊이 70 cm까지의 범위 내에서 채취한 5점의 시료에서 분리한 K-장석을 대상으로 연대측정을 한 결과 119 ± 10 a에서 41 ± 9 a 까지 층서적으로 잘 부합하는 연대결과를 얻었다(그림 15). 이 연구에서 저자들은 별도의 anomalous fading 보정을 실시하지 않았는데, 이는 시료들의 연대가 100년 전후로 그리 오래되지 않아 anomalous fading에 의한 연대 과소평가의 효과가 있었다고 하

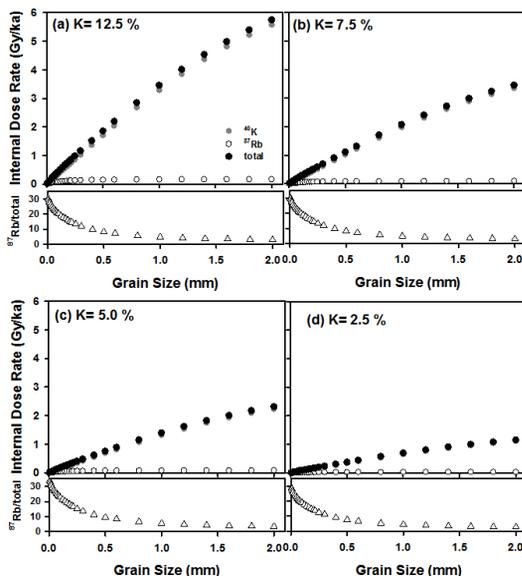


Fig. 13. Dependence of internal dose rates on K-feldspar grain size, with different K contents (Rb contents were calculated using Eqn. 5, based on the given K contents). The ratios of internal dose rate by ^{87}Rb β particles to total internal dose rate were also shown for each K contents.



Fig. 14. A mini XRF system attached to a standard Risø luminescence measurement system, installed in Korea Basic Science Institute.

더라도, 이는 이들 연대의 해석에 영향을 줄 수 있을 만큼 심각하지는 않았을 것으로 판단된다(이 연구에서 시료들의 fading rate는 3%/decade 미만이었으나, 단 1%/decade의 fading이라도 보정을 해야 한다는 주장도 있어(Lamothe, 개인통신), 보정을 하지 않은 IRSL 연대는 논란의 여지가 있을 수 있다). 이들의 연대결과는 K-장석 IRSL 연대측정법이 약 100년 미만의 짧은 퇴적층에서 석영 OSL 연대측정법을 대체하거나, 보조하는 수단으로서 유용한 방법임을 잘 보여주고 있다.

5.2 하안단구(fluvial terrace) 퇴적층

지금까지 국내의 하안단구 퇴적층에 대한 연대측정은 주로 석영 OSL 신호를 이용한 루미네선스 연대측정법이 일반적으로 사용되었다(e.g., Lee *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006a, 2006b; Cho and Lee, 2009; Lee, 2009). Hong *et al.* (2012)은 양구 수입천 유역에 분포하는 두 조의 하안단구 퇴적층에서 K-장석 IRSL 연대측정을 시도하였다. 그 결과, 저지들은 하상비고 약 14 m의 하안단구 퇴적층(1201BS-1)으로부터 69±7 ka, 그리고 하상비고 약 22 m의 하안단구 퇴적층(1201NGM-1)으로부터 124±13 ka의 층서적으로 일치하는 IRSL 연대를 구하였으며(그림 16), 이를 바탕으로 각각의 하안단구 퇴적층이 MIS 5a와 5e의

시기에 형성된 것으로 분류하였다. 더 나아가, 저지들은 이들 연대를 기반으로 약 0.19 mm/yr의 대략적인 하각률을 제시하였고, 이는 삼척 오십천 유역의 하각률(약 0.24 mm/yr; Lee *et al.*, 2011) 및 남동해안 해안단구의 용기울(약 0.2-0.3 mm/yr; Choi *et al.*, 2008)과 유사하다고 주장하였다. 특히, 이 연구에서는 “3.5절 Non- or less fading IRSL 신호”에서 언급한 바와 같이, 재현성이 극히 불량한 별도의 fading 실험을 하지 않고, $g_{2days} = 3.0\%/decade$ 의 fading rate를 가정하여 연대를 보정하였을 때, 기존의 연구결과와 가장 유사한 하각률을 얻었음은 주목할 만하다.

5.3 퇴스(loess)

퇴스와 같은 풍성퇴적층은 오랜 기간 동안 빛에 노출될 기회가 다른 퇴적환경에 비해 많기 때문에, 석영이나 장석입자에 존재하는 기존의 루미네선스 신호들(OSL 및 IRSL 신호)이 퇴적과 함께 완벽하게 제거(complete bleaching)되었을 가능성이 높아 루미네선스 연대측정에 가장 적합한 것으로 알려져 있다. Schatz *et al.* (2012)은 헝가리 Tokaj 지방에 분포하는 약 15m 두께의 퇴스 퇴적층에 대해서 석영 OSL과 K-장석 IRSL, post IR-IRSL 등의 세 가지 루미네선스 신호를 이용하여 연대측정을 실시하고, 각

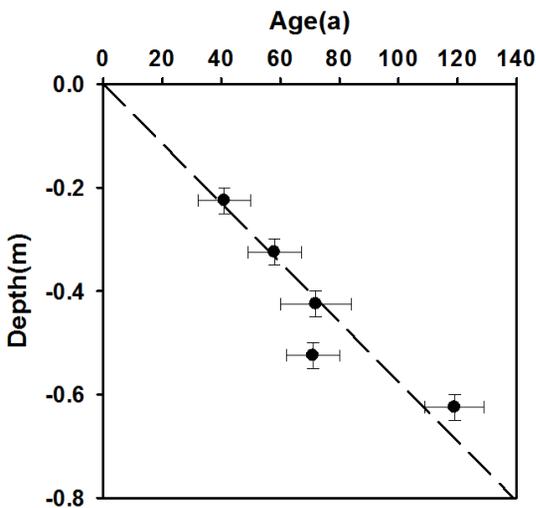


Fig. 15. K-feldspar IRSL dating of tidal flat sediments on the western coast of Korea (redrawn from Hong *et al.*, 2003).

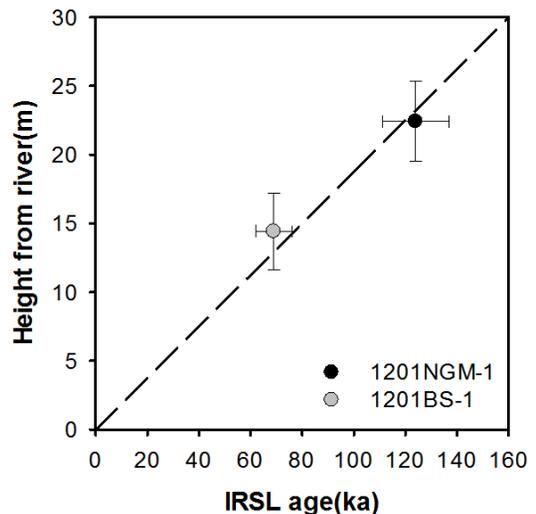


Fig. 16. K-feldspar IRSL ages of fluvial terrace sediments from Suip Cheon, Yang-gu (from Hong *et al.*, 2012).

각의 연대를 상호비교하였다. 연대측정 결과, 서로 다른 루미네선스 신호를 이용하여 구한 연대결과들이 비교적 서로 잘 일치하였으며(그림 17), 해당 퇴적층은 주로 24-60 ka에 퇴적되었고, 25-35 ka의 시기에 퇴적층 내 고토양 형성이 있었을 것으로 해석하였다. 또한, 기존 연구(Sümegei and Hertelendi, 1998) 에서, 방사성탄소연대측정법을 바탕으로 이 퇴적층이 일정한 퇴적율을 가지고 지속적으로 형성되었다고 주장한 것과는 달리, 이들의 연구에서는 고토양층을 기준으로 하부에서는 0.30 mm/yr, 상부에서는 0.86 mm/yr 의 서로 다른 퇴적율을 보고 하였다.

Thiel *et al.* (2011b)은 일본 Niigata와 Tochigi 지역에 위치한 퇴적층 내의 테프라연대와 석영 OSL, K-장석 IRSL, post IR-IRSL₂₉₀ 연대를 비교하였다. Niigata 지역의 퇴적층은 약 7 m의 층후를 보이며, AT (약 25 ka), DKP (약 55 ka 혹은 그 이상), Iz-KT (125-150 ka)의 테프라가 산출되며, Tochigi 지역에서 약 40 m의 두께를 보이는 퇴적층은 Ag-KP (약 45 ka 혹은 그 이상), Aso-4 (85-90 ka), Iz-KT (125-150 ka) 등 시기를 달리하는 여러 테프

라들이 관찰된다. Thiel *et al.* (2011b)의 연구 결과는 50°C에서 측정된 K-장석 IRSL 신호의 경우(“4.2절 등가선량 측정” 참조) fading rate 측정의 부정확성 등의 문제로 인해 신뢰도 높은 연대결과를 얻을 수 없었지만, 석영 OSL 신호 및 K-장석 post IR-IRSL₂₉₀ 연대측정 결과는 기존의 테프라 연대와 잘 일치했음을 보여준다(그림 18).

이들 연구는 기존 신호의 제거를 위해 석영 OSL 신호보다 비교적 긴 자연광에의 노출시간을 필요로 하는 장석 IRSL, post IR-IRSL 신호들도 퇴적층의 연구에 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

5.4 화산쇄설성 퇴적물 및 테프라층(Volcaniclastic sediments and tephras)

화산쇄설성 퇴적물이나 테프라층의 연대는 화산의 분출시기를 직접적으로 지시한다는 점에서 큰 중요성을 지닌다. 하지만, 석영 OSL 신호를 바탕으로 한 루미네선스 연대측정에 있어서 화산활동과 연관된 퇴적물 혹은 화산암지역내에 분포하는(즉, 기반암 지질이 화산암인 경우) 퇴적물들은 그 동안 많은 연구와 논란의 대상이 되어 왔다. 이는 대체로 화산

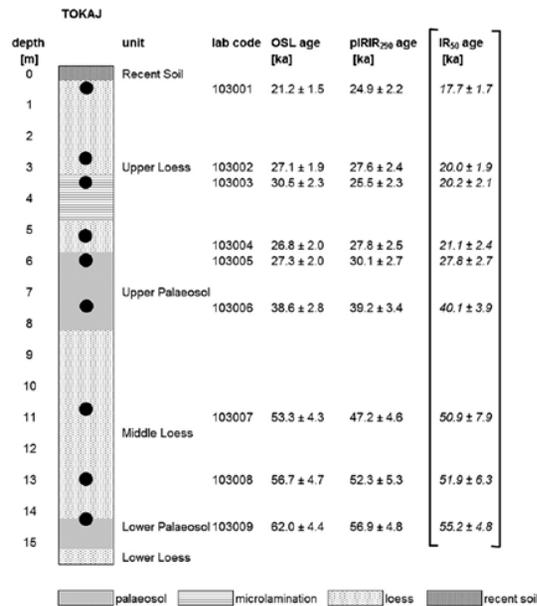


Fig. 17. Quartz OSL, K-feldspar IRSL and post IR-IRSL ages of a loess profile in Tokaj, Hungary (from Schatz *et al.*, 2012).

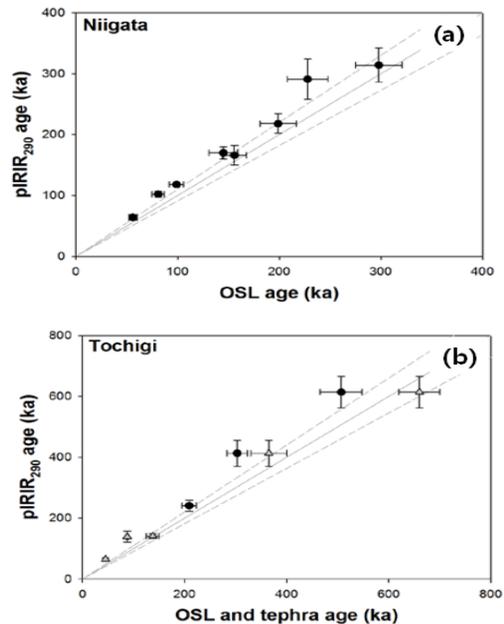


Fig. 18. Comparison of K-feldspar post IR-IRSL₂₉₀ ages with quartz OSL and tephra ages from Niigata and Tochigi sites (modified from Thiel *et al.*, 2012).

암지역 혹은 화산활동과 연관된 퇴적물에서 분리한 석영입자에서 관찰되는 루미네선스 연대측정에 불리한 물리적 특성 때문이라고 보고되고 있다(e.g., 미약한 fast OSL component, OSL 신호의 열적 불안정성 등, Choi *et al.*, 2006; Steffen *et al.*, 2009). 또한, 특별한 경우를 제외하고(e.g., 제주도 하모리층, Cheong *et al.*, 2007), 화산쇄설성 퇴적물이나 테프라층에서는 석영입자가 루미네선스 연대측정 연구에 쓰일 만큼 충분히 산출되지 않는 것도 이들 퇴적물에 대한 석영 OSL 연대측정법 적용의 한계로 작용하기도 한다.

하지만, K-장석은 화산쇄설성 퇴적물과 테프라층에서 흔히 관찰되는 광물중의 하나이며, 퇴적당시 500°C 이상의 고열에 노출되어 incomplete bleaching에 의한 연대와대평가의 가능성이 매우 낮기 때문에, 화산활동의 시기를 추정하는 데에 매우 유리할 것으로 판단된다(incomplete bleaching에 대해서는 Choi *et al.* (2004)의 “2.1.3절. Bleaching (zeroing)” 참조). 특히, 석영 OSL 신호나 K-장석 IRSL 신호에 비해, 빛에 의한 complete bleaching이 불리한 K-장석 post IR-IRSL 신호(“3.5절 Non- or less fading IRSL 신호” 참조)도 열에 의해 기존 신호가 완벽하게 제거될 가능성이 많다는 장점이 있다는 것은 주목할 만하다. 실제로, Choi *et al.* (in preparation)은 울릉도에서 채취한 화산쇄설성 퇴적층 및 테프라층(석포 I, II, III, IV)에 대한 K-장석 IRSL 및 post IR-IRSL₂₉₀ 연대측정을 실시하여, 나리분지의 붕괴 시기를 약 3 ka 전후, 울릉분지 최상부 석포 I 테프라의 퇴적시기를 약 6 ka로 보고하였다.

이 연구에서 제시한 연대들은 anomalous fading 효과를 보정하지 않은 K-장석 post IR-IRSL 연대로서, 층서대비에 의한 연대와도 잘 일치하였다. 저자들은 이 연구에서, 50°C에서 측정된 IRSL 신호의 fading rate를 산출하고, 이를 바탕으로 한 연대보정을 실시하였는데, 보정된 IRSL 연대들이 이미 알려진 상·하부의 테프라 연대(e.g., AT 테프라)와 일치하지 않았으며, 오히려 fading rate 보정을 하지 않은 K-장석 post IR-IRSL 연대가 테프라 연대 및 퇴적물에 기반한 추정연대와 잘 일치함을 확인하고, Huntley and Lamothe (2001) 모델에 근거한 fading rate 보정과정의 신뢰도에 의문을 제기하였다. 최근 Buylaert *et al.* (in press)은 퇴적당시 bleaching이

완벽한 상태로 퇴적된 시료들의 K-장석 IRSL 연대(fading rate에 대한 보정이 이루어지지 않은 연대; uncorrected IRSL age)와 post IR-IRSL₂₉₀ 연대는 서로 일정한 함수관계로 정의되며, post IR-IRSL₂₉₀ 신호가 퇴적당시 완벽하게 bleaching되지 않았다면, 이들 시료의 D_e(혹은 연대)는 IRSL과 post IR-IRSL₂₉₀를 정의하는 곡선의 아래부분(즉, 회귀곡선의 -10% 보다 오른쪽에 해당하는 구간)에 도시된다고 제안하였다(그림 19(a)). Choi *et al.* (in preparation)에서도 분석된 K-장석들의 IRSL 연대와 post IR-IRSL 연대를 비교한 결과, 거의 모든 시료들에서 두 연대가 일정한 곡선상에 도시됨을 관찰하였고(그림 19(b)), 이는 앞서 언급한 바와 같이, 화산분출시 높은 온도로 인해 화산쇄설성 퇴적물이나 테프라층에 대한 K-장석 IRSL 연대측정시 incomplete bleaching에 의한 연대와대평가의 가능성이 크지 않음을 잘 나타낸다.

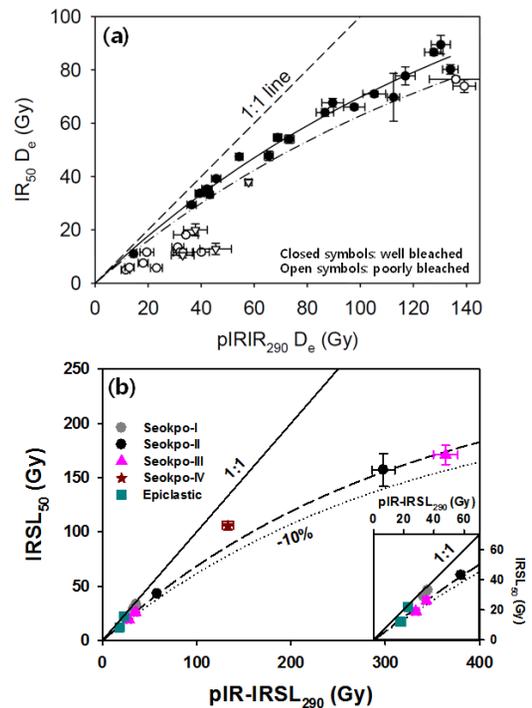


Fig. 19. (a) Comparison of IRSL and post IR-IRSL₂₉₀ equivalent dose values of K-feldspars (Buylaert *et al.*, in press). The samples whose D_e values are offset from the -10% of the fitting curve are taken as incomplete bleached samples (b) Comparison of IRSL and post IR-IRSL₂₉₀ equivalent dose values of K-feldspar extracts recovered from epiclastic and tephra sediments in Ulleung Island (modified from Choi *et al.*, in preparation).

6. 결 언

K-장석 IRSL 연대측정법이 개발되어 다양한 퇴적층의 연대측정에 적용된 지 20여년이 지났지만, 국내에서는 석영입자를 이용한 OSL 연대측정법에 비해 그 적용사례가 거의 전무한 실정이다. 이에 여러 가지 원인이 있지만, 특히 anomalous fading 현상으로 인한 연대과소평가에 대한 우려가 주된 이유라 할 수 있다. 또한 K-장석입자를 분리하기 위한 실험실 작업에 수 주일의 상당한 시간과 노력이 소요된다는 점도 그 원인 중의 하나일 것이다. 하지만, 본문에서 언급한 바와 같이 최근 들어 anomalous fading 현상이 거의 없는 IRSL 신호 요소를 추출하기 위한 이론적/실험적 시도들이 매우 활발하게 진행되고 있어, 향후 보다 폭넓은 퇴적환경에서 K-장석 IRSL 연대측정법이 신뢰도 높게 적용될 수 있을 것이다. 특히, 석영 OSL 연대측정법으로는 논란의 여지가 있는 MIS 5e 이전 퇴적층이나, 중기·전기 구석기 유물 출토층에 대한 연대측정이 가능해 짐으로써, 관련 학문분야에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

K-장석 IRSL 연대측정법의 습득을 위한 체계적인 문헌이 아직 발간되지 않았고, 루미네선스 연대 측정 전문저널에서 다루고 있는 내용들도 end-user의 입장에서는 쉽게 이해되지 않는 측면이 있다. 따라서, 이 논평에서는 K-장석 IRSL 연대측정법을 적용하고자 하는 연구자들이 관련 연구결과들을 쉽게 접할 수 있도록, 가급적 많은 참고문헌을 소개하였다. 이 논평을 바탕으로 앞으로 국내에서도 K-장석 IRSL 연대측정법을 이용한 연대측정 연구, 특히 200 ka 이상의 오래된 퇴적층에 대한 연구들이 보다 활발하게 진행될 수 있기를 기대한다.

사 사

이 연구는 한국기초과학지원연구원의 “재난분석 과학연구”사업(C3371A)의 지원으로 수행되었다. 건설적인 조언을 해주신 익명의 심사위원께도 감사사를 드린다.

참고문헌

Aitken, M.J., Zimmerman, D.W. and Fleming, S.J., 1968, Thermoluminescence dating of ancient pottery. *Nature*,

- 219, 442-445.
- Aitken, M.J., 1998, *An introduction to optical dating*. Oxford University Press, London.
- Auclair, M., Lamothe, M. and Huot, S., 2003, Measurements of anomalous fading for feldspar IRSL using SAR. *Radiation Measurements*, 37, 487-492.
- Auclair, M., Lamothe, M., Lagroix, F. and Banerjee, S.K., 2007, Luminescence investigation of loess and tephra from Halfway House section, Central Alaska. *Quaternary Geochronology*, 2, 34-38.
- Bailiff, I.K. and Barnett, S.M., 1994, Characteristic of infra-red stimulated luminescence from a feldspar at low temperatures. *Radiation Measurements*, 23, 541-545.
- Bøtter-Jensen, L., McKeever, S.W.S. and Wintle, A.G., 2003, *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*, Elsevier Science, p. 355.
- Buylaert, J.P., Jain, M., Murray, A.S., Thomsen, K.J., Thiel, C. and Sohbaty, R., 2012, A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas*, 41, 435-451.
- Buylaert, J.P., Murray, A.S., Gebhardt, C., Sohbaty, R., Ohlendorf, C., Thiel, C. and Zolitschka, B., Luminescence dating of the PASADO core 5022-1D from Laguna Potrok Aike (Argentina) using IRSL signals from feldspar. *Quaternary Science Reviews (in press)*.
- Buylaert, J.P., Murray, A.S. and Huot, S., 2008, Optical dating of an Eemian site in Northern Russia using K-feldspar. *Radiation Measurements*, 43, 715-720.
- 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., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C. and Jeong, G.Y., 2007, Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southwestern coast of Jeju Island, Korea. *Quaternary Geochronology*, 2, 266-271.
- Cho, Y.D. and Lee, G.R., 2009, Analysis of fluvial terraces at Kohyun River in Youngcheon City. *Journal of the Korean Geographical Society*, 44, 447-462.
- 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.
- Choi, J.H., Chun, J.H., Hong, S.C. and Yeo, E.Y., Establishing chronology of tephric and epiclastic sediments from Ulleung Island (Korea) using K feldspar IRSL signals, *in preparation*.
- Choi, J.H., Duller, G.A.T., Wintle, A.G. and Cheong, C.-S., 2006, Luminescence characteristics of quartz from Southern Kenyan Rift Valley: Dose estimation using LM-OSL SAR. *Radiation Measurements*, 41, 847-854.

- Choi, S.J., Meritts, D.J. and Ota, Y., 2008, Elevations and ages of marine terraces and late Quaternary rock uplift in southeastern Korea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113, B10403.
- Duller, G.A.T., Bøtter-Jense, L. and Murray, A.S., 2003, Combining infrared- and green-laser stimulation sources in single-grain luminescence measurements of feldspar and quartz. *Radiation Measurements*, 37, 543-550.
- Fu, X., Zhang, J. and Zhou, L.-P., 2012, Comparison of the properties of various optically stimulated luminescence signals from potassium feldspar. *Radiation Measurements*, 47, 210-218.
- Hong, D.G., Choi, M.S., Han, J.-H. and Cheong, C.-S., 2003, Determination of sedimentation rate of a recently deposited tidal flat, western coast of Korea, using IRSL dating. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1185-1189.
- Hong, S.C., Choi, J.H., Kim, J.Y. and Kim, J.W., 2012, Geomorphological applications of rock surface IRSL dating-A case study on the fluvial terraces in Suip Cheon, Yanggu. Abstract book of 2012 spring meeting of the Korean Geomorphological Association, 58-59.
- Huntley, D.J. and Baril, M.R., 1997, The K content of the K-feldspars being measured in optical dating or in thermoluminescence dating. *Ancient TL*, 15, 11-13.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W., 1985, Optical dating of sediments. *Nature*, 313, 105-107.
- Huntley, D.J. and Hancock, R.G.V., 2001, The Rb contents of the K-feldspar grains being measured in optical dating. *Ancient TL*, 19, 43-46.
- Huntley, D.J. and Lamothe, M., 2001, Ubiquity of anomalous fading in K-feldspar and the measurement and correction for it in optical dating. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38, 1093-1106.
- Huot, S. and Lamothe, M., 2003, Variability of infrared stimulated luminescence properties from fractured feldspar grains. *Radiation Measurements*, 37, 499-503.
- Hütt, G., Jaek, I. and Tchonka, J., 1988, Optical dating: K-feldspars optical response stimulation spectra. *Quaternary Science Reviews*, 7, 381-385.
- Jain, M. and Ankjærgaard, C., 2011, Towards a non-fading signal in feldspar: insight into charge transport and tunnelling from time-resolved optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 46, 292-309.
- Jain, M., Murray, A.S., Bøtter-Jensen, L. and Wintle, A.G., 2005, A single-aliquot regenerative-dose method based on IR (1.49 eV) bleaching of the fast OSL component in quartz. *Radiation Measurements*, 39, 309-318.
- Jeong, G.Y. and Choi, J.H., 2012, Variation in quartz OSL components with lithology, weathering and transportation. *Quaternary Geochronology*, 10, 320-326.
- Kars, R.H., Busschers, F.S. and Wallinga, J., 2012, Validating post IR-IRSL dating on K-feldspars through comparison with quartz OSL ages. *Quaternary Geochronology*, 12, 74-86.
- Kars, R.H., Wallinga, J. and Cohen, K.M., 2008, A new approach towards anomalous fading correction for feldspar IRSL dating-tests on samples in field saturation. *Radiation Measurements*, 43, 786-790.
- Kim, J.Y., Kim, J.Y., Lee, J.C. and Kim, J.K., 2006a, Fluvial landforms and terrace formations in Yeongyangri, Yeosu (Korea)-Recognition of terraces using DEM and analysis of fluvial stratigraphy. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 13(1), 71-84.
- Kim, J.Y., Kim, J.Y., Yang, D.Y., Yun, H.S., Yi, S.H., Kim, J.C., Nahm, W.H., Oh, G.C. and Kim, J.K., 2006b, Fluvial stratigraphy and palaeo-environments of lower Han River, near Hanam, part 2-Stratigraphic investigations. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 13(2), 55-73.
- Kook, M.H., Lapp, T., Murray, A.S., Thiel, C., Choi, J.H. and Kim, J.Y., 2012, A Risø XRF attachment for major element analysis of aliquots of quartz and feldspar separates. Abstract book of "3rd Asia-Pacific Conference on Luminescence and Electron Spin Resonance Dating", Okayama, p. 41.
- Lamothe, M. and Auclair, M., 1999, A solution to anomalous fading and age shortfalls in optical dating of feldspar minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 171, 119-129.
- Lamothe, M., Auclair, M., Hamzaoui, C. and Huot, S., 2003, Towards a prediction of long-term anomalous fading of feldspar IRSL. *Radiation Measurements*, 37, 493-498.
- Lamothe, M., Duller, G.A.T., Huot, S. and Wintle, A.G., 2001, Measuring a laboratory radiation dose in feldspar using SAR. In 1st North American Luminescence Dating Workshop, Tulsa, United States, abstract with program, p. 14.
- Lee, G.R., 2009, Properties of channel and evolutions of fluvial terraces in Odae River. *Journal of the Korean Geographical Society*, 44, 224-239.
- Lee, M.B., Lee, G.R. and Kim, N.S., 2005, Geomorphic processes of the terraces at lower reach of Yeongpyeong River in Chugaryeong Rift Valley, Central Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 40, 716-729.
- Lee, S.Y., Seong, Y.B., Shin, Y.-K., Choi, K.H., Kang, H.-C. and Choi, J.H., 2011, Cosmogenic ¹⁰Be and OSL dating of fluvial strath terraces along the Osip-cheon River, Korea: tectonic implications. *Geosciences Journal*, 15, 349-444.
- Li, B. and Li, S.-H., 2011a, Luminescence dating of K-feld-

- spar from sediments: a protocol without anomalous fading correction. *Quaternary Geochronology*, 6, 468-479.
- Li, B. and Li, S.-H., 2011b, Thermal stability of infrared stimulated luminescence of sedimentary K-feldspar. *Radiation Measurements*, 46, 29-36.
- Li, B. and Li, S.-H., 2012, A reply to the comments by Thomsen *et al.* on 'Luminescence dating of K-feldspar from sediments: a protocol without anomalous fading correction'. *Quaternary Geochronology*, 8, 49-51.
- Li, B., Li, S.H., Duller, G.A.T. and Wintle, A.G., 2011, Infrared stimulated luminescence measurements of single-grains of K-rich feldspar for isochron dating. *Quaternary Geochronology*, 6, 71-81.
- Li, B., Li, S.H., Wintle, A.G. and Zhao, H., 2008, Isochron dating of sediments using luminescence of K-feldspar grains. *Journal of Geophysical Research*, 113, F02026.
- Li, S.-H. and Tso, M.Y.W., 1997, Lifetime determination of OSL signal from potassium feldspar. *Radiation Measurements*, 27, 119-121.
- Li, S.-H., Tso, M.Y.W. and Wong, N.W.L., 1997, Parameters of OSL traps determined with various linear heating rates. *Radiation Measurements*, 27, 43-47.
- Mejdahl, V., 1987, Internal radioactivity in quartz and feldspar grains. *Ancient TL*, 5, 10-17.
- Murray, A.S., Buylaert, J.P., Thomsen, K.J. and Jain, M., 2009, The effect of preheating on the IRSL signal from feldspar. *Radiation Measurements*, 44, 554-559.
- 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.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2003, The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 37, 377-381.
- Preusser, F., Chithambo, M.L., Götte, T., Martini, M., Ramseyer, K., Sendezera, E.J., Susino, G.J. and Wintle, A.G., 2009, Quartz as a natural luminescence dosimeter. *Earth Science Reviews*, 97, 184-214.
- Readhead, M.L., 2002, Absorbed dose fraction for ^{87}Rb β particles. *Ancient TL*, 20, 25-28.
- 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.
- Reimann, T., Tsukamoto, S., Naumann, M. and Frechen, M., 2011, The potential of using K-rich feldspars for optical dating of young coastal sediments - A test case from Darss-Zingst peninsula (southern Baltic Sea coast). *Quaternary Geochronology*, 6, 207-222.
- Risø DTU, 2010, Guide to "The Risø TL/OSL Reader", p. 59.
- Schatz, A.K., Buylaert, J.P., Murray, A., Stevens, T. and Scholten, T., 2012, Establishing a luminescence chronology for a paleosol-loess profile at Tokaj (Hungary): A comparison of quartz and polymineral IRSL signals. *Quaternary Geochronology*, 10, 68-74.
- Short, M.A. and Huntley, D.J., 1992, Infrared stimulation of quartz. *Ancient TL*, 10, 19-21.
- Sohbati, R., Murray, A.S., Jain, M., Thomsen, K.J., Hong, S.C., Yi, K. and Choi, J.H., Na-rich feldspar as a luminescence dosimeter in infrared stimulated luminescence (IRSL) dating. *Radiation Measurements*, *in press*.
- Spooener, N.A., 1994, The anomalous fading of infrared-stimulated luminescence from feldspars. *Radiation Measurements*, 23, 625-632.
- Steffen, D., Preusser, F. and Schlunegger, F., 2009, OSL quartz age underestimation due to unstable signal components. *Quaternary Geochronology*, 4, 353-362.
- Sümeği, P. and Hertelendi, E., 1998, Reconstruction of microenvironmental changes in the Kopasz Hill loess area at Tokaj (Hungary) between 15 and 70 ka BP. *Radiocarbon*, 40, 855-863.
- Templer, R.H., 1986, The localised transition model of anomalous fading. *Radiation Protection Dosimetry*, 17, 493-497.
- Thiel, C., Buylaerts, J.P., Murray, A.S., Elmejdoub, N. and Jedoui, Y., 2012, A comparison of TT-OSL and post-IR IRSL dating of coastal deposits on Cap Bon peninsula, north-eastern Tunisia. *Quaternary Geochronology*, 10, 209-217.
- Thiel, C., Buylaerts, J.P., Murray, A.S., Terhorst, B., Hofer, I., Tsukamoto, S. and Frechen, M., 2011a, Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) - Testing the potential of an elevated temperature post-IR IRSL protocol. *Quaternary International*, 234, 23-31.
- Thiel, C., Buylaerts, J.P., Murray, A.S. and Tsukamoto, S., 2011b, On the applicability of post IR-IRSL dating to Japanese loess. *Geochronometria*, 38, 369-378.
- 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.S., 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.
- Visocekas, R., 1985, Tunneling radiative recombination in labradorite; its association with anomalous fading of thermoluminescence. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 10, 521-529.
- Visocekas, R., 1993, Tunneling radiative recombination

- in K-feldspar sanidine. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21, 175-178.
- Wallinga, J., Bos, A.J.J., Dorenbos, P., Murray, A.S. and Schokker, J., 2007, A test case for anomalous fading correction in IRSL dating. *Quaternary Geochronology*, 2, 216-221.
- Wallinga, J., Murray, A.S., Duller, G.A.T. and Tomqvist, T.E., 2001, Testing optically stimulated luminescence dating of sand-sized quartz and feldspar from fluvial deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 617-630.
- Wallinga, J., Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2000, The single-aliquot regenerative-dose(SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. *Radiation Measurements*, 32, 529-533.
- Wintle, A.G., 1973, Anomalous fading of thermoluminescence in mineral samples. *Nature*, 245, 143-144.
- 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.
- Zhao, H. and Li, S.-H., 2005, Internal dose rate to K-feldspar grains from radioactive elements other than potassium. *Radiation Measurements*, 40, 84-93.

투 고 일 : 2013년 2월 25일
 심 사 일 : 2013년 2월 26일
 심사완료일 : 2013년 3월 25일