

Characteristics of time-resolved optically stimulated luminescence (OSL) on Paleolithic paleosol quartz

Duk-Geun Hong¹, Ki-Bum Kim², and Myung-Jin Kim^{2,3}, ★

¹Dept. of Physics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

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

³Archaeological Science Institute, RADPION Inc., Daejeon 34111, Korea

(Received November 11, 2017; Revised January 4, 2018; Accepted January 11, 2018)

구석기 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광 특성 연구

홍덕균¹ · 김기범² · 김명진^{2,3}, ★

¹강원대학교 물리학과, ²강원대학교 기초교육원,

³(주)라드피온 고고과학연구소

(2017. 11. 11. 접수, 2018. 1. 4. 수정, 2018. 1. 11. 승인)

Abstract In this study, we measured the time-resolved optically stimulated luminescence (TR-OSL) of Paleolithic paleosol quartz and evaluated its lifetime. Considering the lifetime dependence on the preheating applied after irradiation, the radiation exposure, and the optical pulse stimulation, we found that the optimum measurement condition for determining the lifetime of paleosol quartz was the optical pulse stimulation at a dwelling time of 250 μ s, pulse width of 10 μ s, and sweep number of 100,000, without preheating after 100 Gy of irradiation. Based on the dependence of the lifetime on the reading temperature, the thermal quenching activation energy ΔE and thermal assistance activation energy E_a were evaluated as 0.60 ± 0.14 eV and 0.053 ± 0.029 eV, respectively. These values were in good agreement with those reported in the literature. Therefore, we concluded that the resulting kinetic parameters for paleosol quartz are quite reliable.

요약: 이 연구에서는 구석기 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광 신호를 측정 후 측정된 냉광신호로부터 시료의 냉광수명을 산출하였다. 냉광수명의 방사선 조사 후 열전처리 의존성 및 조사선량 의존성, 광자극 펄스 의존성을 모두 고려한 결과, 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광은 방사선량 100 Gy 조사 후 별도의 열전처리 없이 펄스 주기 250 μ s, 펄스 폭 10 μ s, 반복수 100,000번인 광자극 펄스를 가하여 측정할 때 정확한 냉광수명이 산출됨을 알 수 있었다. 냉광수명의 측정온도 의존성으로부터 산출된 열소광 활성화 에너지 ΔE , thermal assistance 활성화 에너지 E_a 는 각각 0.60 ± 0.14 eV, 0.053 ± 0.029 eV 이었으며, 이 결과는 기존에 보고된 연구 성과와 매우 잘 일치하였다. 결론적으로 이 연구에서 산출된 고토양층 석영의 운동학 변수 값은 매우 신뢰할 수 있다고 판단된다.

Key words: time-resolved OSL, OSL measurement system, lifetime, Paleolithic paleosol quartz

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-364-8589 Fax : +82-(0)42-866-0426

E-mail : nwdang@archaeometry.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

냉광(luminescence)은 석영 및 장석, 방해석 등을 포함하는 여러 무기결정의 락에 축적된 전자들이 외부 에너지에 의해 자유상태가 된 후 정공과 결합하여 빛을 방출하는 현상이다. 방사선 측정과 관련된 냉광 중 광자극 냉광(optically stimulated luminescence, OSL)은 시료에 대한 광자극 기법에 따라 지속과 광자극 냉광(continuous-wave OSL) 및 선형변조 광자극 냉광(linear modulation OSL), 시간분해 광자극 냉광(time-resolved OSL)으로 구분되며, 현재 이들 냉광 신호를 이용하여 시료의 방사선측정 및 물리적 특성을 파악하는 연구가 진행되고 있다.¹

시간분해 광자극 냉광은 광자극과 냉광 측정이 동시에 이루어지는 지속과 광자극 냉광 및 선형변조 광자극 냉광과 달리 펄스를 이용한 짧은 시간 동안의 광자극과 이로 인해 방출되는 냉광이 시간적으로 구분되어 측정된다. 따라서 시간분해 광자극 냉광은 측정된 냉광이 단지 광전자증배관의 전기적 잡음에만 영향을 받기 때문에 다음과 같은 장점이 존재한다.² 첫째, 펄스 후에 측정되는 냉광의 잡음은 단지 광전자증배관의 전기적 잡음뿐이라는 점에서 측정시간 동안 냉광의 신호에 대한 잡음(signal-to-background) 비가 매우 높다. 둘째, 광자극 펄스 폭이 매우 작기 때문에 광자극으로 인해 활성화되는 전자의 비율이 무시할 정도로 작아 오랫동안 냉광을 모니터링 할 수 있다. 셋째, 시간분해 광자극 냉광은 시료의 냉광수명(lifetime, 광자극 후 냉광 방출까지의 시간)을 연구하는데 매우 중요한 정보를 제공한다.

석영은 자연계에 존재하는 결정 중 자연방사선량계로 가장 많이 이용되는 물질이며, 현재까지 이에 대한 많은 냉광 특성이 조사되었다. 그러나 대부분의 연구가 지속과 광자극 냉광³⁻⁶과 선형변조 광자극 냉광^{7,8}으로 검출된 결과이기 때문에 석영의 광자극 냉광에 대한 구체적인 모델은 아직까지 제시되지 못하고 있다. 따라서 석영의 광자극 냉광 현상을 자세히 규명하기 위해서는 시간분해 광자극 냉광 연구가 필수적이다. 이 연구에서는 최근 자체 개발한 광자극 냉광 측정시스템⁹을 이용하여 구석기 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광을 측정하고 냉광수명을 산출한 후, 이에 대한 물리적 특성을 조사하였다. 또한 측정된 결과를 기존의 연구 성과와 비교 검토하였다.

2. 연구방법

이 연구에서는 강원도 홍천군 하화계리 구석기 유적에서 채취된 고토양층 시료를 화학처리하여 추출한 입경 125~250 μm 의 순수한 석영(시료명 : KWU-1)을 시료로 사용하였다.¹⁰ 측정에 앞서 고토양층 석영의 열적 절대영년(thermal zeroing) 및 민감도 향상을 위해 전기로에서 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 1시간 동안 열처리하였다.

시간분해 냉광 측정은 최근 자체 개발한 광자극 냉광 측정시스템으로 이루어졌다.⁹ 냉광 측정시스템의 구성은 광자극 광원으로 470 \pm 20 nm 파장을 가진 2개의 청색 파워 발광다이오드(LED : light emitting diode, LXHL-PB02)가 사용되었으며, DAQ 보드(NI PCI 6250)를 이용하여 발광다이오드의 광원을 광자극 펄스의 형태로 전환하였다. 발광다이오드로부터 방출되는 자극광은 Schott GG-420 필터와 VIS-liquid light guide (VIS-LLG, Newport #77631)를 거쳐 시료에 전달되도록 제작되었다. 광자극 냉광 검출부는 두께 7.5 mm의 Hoya U-340 필터와 자외선 영역에 대하여 높은 검출효율을 갖는 광전자증배관(bialkali EMI 9235QB), 계측 주기 100 ns까지 시간분해 광자극 냉광의 정확한 측정이 가능한 multichannel scaler (ORTEC MCS-PCI)로 구성되었다. 시료에 대한 방사선 조사는 소형 X-ray 발생장치(Varian VF-50J)와 300 μm 두께의 Al absorber가 부착된 delay shutter를 이용하여 이루어졌다.¹¹ 이 연구에서 사용된 광자극 냉광 측정시스템의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다.

시간분해 광자극 냉광 측정은 방사선 조사, 열전처리, 냉광 측정 순으로 이루어졌다. 광자극 펄스는 주기 250 μs , 폭 10 μs , 반복횟수 100,000번을 기본 펄스로 설정하였고, 각 펄스 당 시간분해 광자극 냉광

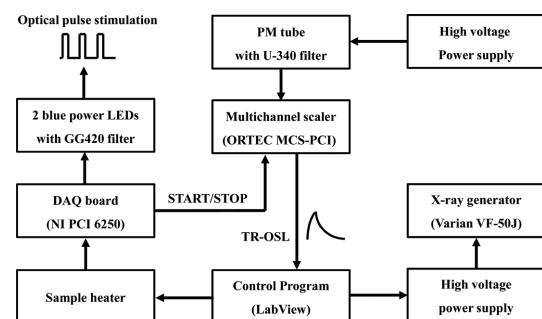


Fig. 1. Schematic diagram of the OSL measurement system used in this study.

신호의 계측 주기를 1 $\mu\text{s}/\text{ch}$ 로 고정하였다. 또한 냉광 측정 시 110 $^{\circ}\text{C}$ 열자극 냉광(thermoluminescence) 피크로 인한 간섭을 방지하기 위하여 시료의 온도가 120 $^{\circ}\text{C}$ 가 된 후에 측정을 시작하였다. 측정된 시간분해 광자극 냉광 신호는 식 (1)의 단일지수함수로 곡선 접합 가능하다.¹²

$$L(t) = L_0 \exp[-(t-t_{ON})/\tau] \quad (1)$$

이 식에서 τ 는 시료의 냉광수명, t_{ON} 은 광자극 펄스 동안의 시간을 의미한다. 이 연구에서는 단일지수함수와 비선형 최소자승법(Lenenberg-Marquardt 알고리즘)이 적용된 Origin 6.1 프로그램을 사용하여 열처리된 고토양층 석영에서 측정된 시간분해 광자극 냉광 신호의 냉광수명을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 냉광수명의 열전처리 의존성

냉광 측정시 열전처리는 시료에 인위적으로 전리성 방사선을 조사한 경우와 자연 상태에서 자연방사선에 조사된 경우의 결과에서 보이는 차이를 보정할 목적으로 수행된다.¹³ 따라서 시간분해 광자극 냉광 측정에서도 시료에 대한 열전처리 필요성 및 냉광수명의 열전처리 의존성을 고려해야만 한다.

이 연구에서는 시료의 냉광수명에 대한 열전처리 의존성을 평가하기 위하여 열처리를 하지 않은 고토양층 석영과 600 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열처리된 고토양층 석영을 이용하였다. 각각의 고토양층 석영에 소형 X-선 발생 장치를 이용하여 방사선량 100 Gy를 조사한 후 열전처리 온도를 200 $^{\circ}\text{C}$ 에서부터 280 $^{\circ}\text{C}$ 까지 20 $^{\circ}\text{C}$ 씩 증가시키며 시간분해 광자극 냉광을 측정하였다. 각 온도에서 열전처리는 60초 동안 이루어졌다. 측정된 시간분해 광자극 냉광 신호를 식 (1)로 곡선 접합하여 냉광수명을 산출하였고, 각 열전처리 온도에 대한 냉광수명은 3개의 시료 디스크(aliquot)로부터 산출된 냉광수명을 평균하여 결정하였다. Fig. 2(a)는 열처리를 하지 않은 고토양층 석영(Fig. 2(a)의 “Natural”)과 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 열처리된 고토양층 석영(Fig. 2(a)의 “Annealed at 600 $^{\circ}\text{C}$ ”)의 열전처리 온도에 따른 냉광수명 변화를 나타낸 그림이다. 열처리를 하지 않은 고토양층 석영의 경우 냉광수명은 평균 $33.30 \pm 0.62 \mu\text{s}$ 로 열전처리 온도와 무관하게 일정한 값을 가졌으나, 열처리된 고토양층 석영의 경우 냉광수명은 열전처리 온도에 따라 증가하였다.

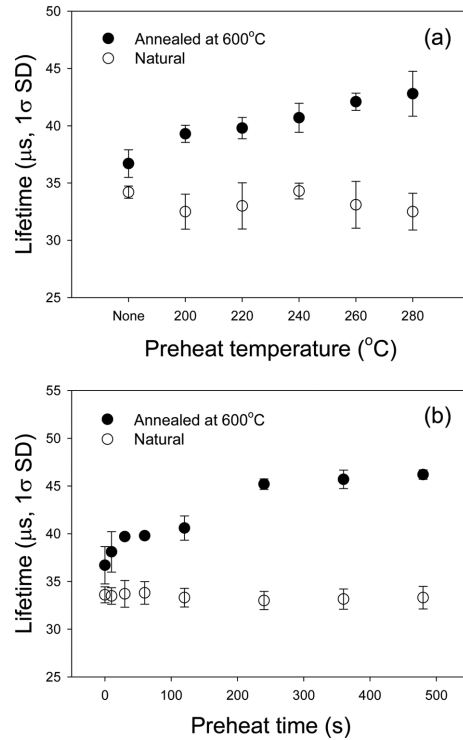


Fig. 2. The dependence of lifetime on preheat temperature in a duration of 60 s (a) and preheat duration time at a temperature of 220 $^{\circ}\text{C}$ (b).

열전처리의 경우 열전처리 온도뿐만 아니라 시간도 중요한 인자이다. 따라서 냉광 측정시 열전처리 온도로 일반적으로 사용되는 220 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열전처리 시간을 0초에서부터 480초까지 증가시켜가며 시간분해 광자극 냉광을 측정하고 위와 동일한 방법으로 고토양층 석영의 냉광수명을 산출하였다. Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이, 열처리를 하지 않은 고토양층 석영의 경우 냉광수명은 평균 $33.42 \pm 0.38 \mu\text{s}$ 로 열전처리 온도뿐만 아니라 시간과도 무관하게 일정한 값을 가졌으나, 열처리된 고토양층 석영의 경우 냉광수명은 열전처리 시간에 따라 증가하다가 240초 이후에서는 일정한 값으로 수렴되어짐을 알 수 있었다.

이들 결과로부터 열처리를 하지 않은 고토양층 석영의 냉광수명은 열전처리 조건에 영향을 받지 않지만, 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 열처리된 고토양층 석영은 열전처리 온도 및 시간에 모두 의존적임을 알 수 있었다. 또한 열처리를 하지 않은 고토양층 석영과 열처리된 고토양층 석영의 냉광수명은 열전처리를 하지 않는 경우에 가장 유사한 값을 보였다. 이는 BDH 석영

(BDH Ltd, UK)을 대상으로 한 Galloway의 결과¹⁴와도 일치한다. 따라서 이후의 연구에서는 냉광수명의 열전 처리에 대한 의존성을 고려하지 않기 위해 시간분해 광자극 냉광 측정 시 열전처리 과정을 제외하였다.

3.2. 냉광수명의 조사선량 의존성

냉광 측정시 시료에 조사하는 전리성 방사선은 결정을 이온화시키고 이때 발생한 자유전자의 대부분은 불순물 덩어리에 포획된다. 이 연구에서는 다양한 크기의 X-선 선량을 시료에 조사하여 선량에 따른 냉광수명의 의존도를 조사하였다. 이를 위해 열처리된 고토양층 석영에 방사선량을 25 Gy에서 150 Gy까지 25 Gy씩 증가시키며 조사한 후, 각 시료에 대하여 시간분해 광자극 냉광을 측정하였다. 각각의 X-선 선량에 대하여 3 개의 시료 디스크를 이용하여 냉광수명을 산출한 후 이를 평균하였다. Fig. 3에 X-선 선량에 따른 열처리된 고토양층 석영의 냉광수명 변화를 나타내었으며, 이로부터 조사선량과 냉광수명은 서로 상관관계가 존재하지 않음을 알 수 있었다. 하지만 조사선량이 50 Gy 이하에서는 냉광수명의 표준편차가 상대적으로 매우 큼을 알 수 있었다. 따라서 시간분해 광자극 냉광 측정을 위해 시료에 조사하는 방사선량을 100 Gy로 고정하였다.

3.3. 냉광수명의 반복측정 의존성

냉광 측정시 시료는 전리성 방사선 조사, 열전처리, 광자극 등의 과정을 반복적으로 경험하며, 이로 인해 방사선에 대한 시료의 민감도가 변화하여 냉광 세기가 변화될 수 있다. 이 연구에서는 단일 시료에 대하여 방사선 조사와 시간분해 광자극 냉광 측정을 반복적으로 수행한 후 시료의 시간분해 광자극 냉광 세기

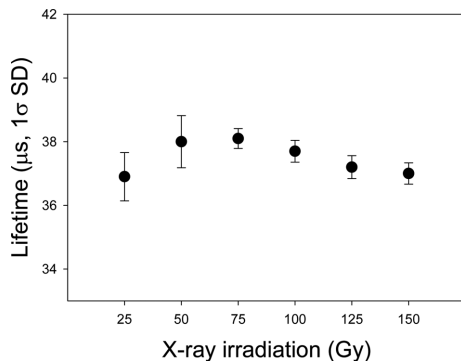


Fig. 3. The change of lifetime against the increase of X-ray irradiation.

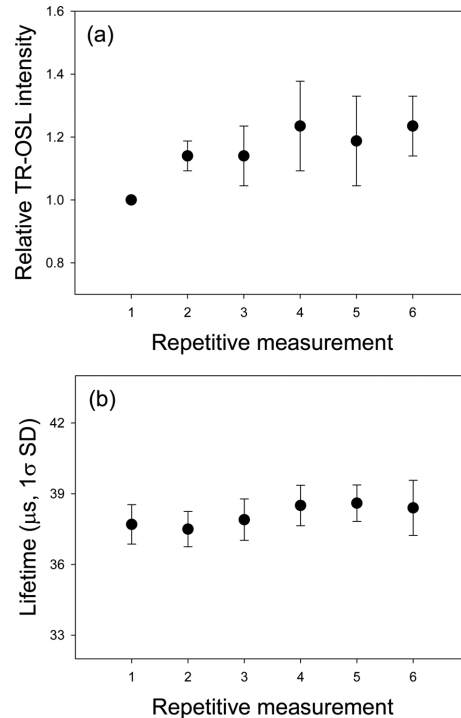


Fig. 4. The influence on intensity (a) and lifetime (b) according to the repeated measurements.

및 냉광수명이 영향 받는지를 조사하였다. 이를 위해 열처리된 고토양층 석영에 방사선량을 100 Gy 조사한 후, 측정온도 120 °C에서 시간분해 냉광 신호를 측정하였다. 반복 측정에 따른 영향을 판단하기 위하여 이 과정을 동일한 시료에 대하여 6 회 반복하였다. 냉광수명은 3 개의 시료에서 산출된 값들을 각각 평균하여 결정하였다. Fig. 4에 반복 측정에 따른 시간분해 광자극 냉광 세기 및 냉광수명의 변화를 나타냈다. 시간분해 광자극 냉광 세기는 모든 채널의 세기를 합한 값이며, 최초 세기를 이용하여 나머지를 규격화(normalization) 하였다. Fig. 4(a)에서 보는 것처럼 시간분해 광자극 냉광 세기는 두번째 측정 이후부터는 오차를 고려했을 때 서로 유사한 경향을 보였다. 반면에 시료의 냉광수명은 평균 $38.10 \pm 0.36 \mu\text{s}$ 로 반복측정에 따른 시료의 민감도 변화와 상관없이 항상 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다(Fig. 4(b)).

3.4. 냉광수명의 광자극 펄스 의존성

시간분해 광자극 냉광 신호는 광자극 펄스 조건에 따라 모양이 달라지므로 광자극 펄스의 펄스 주기와 펄스 폭을 변화시켜가며 시료의 냉광수명 변화를 관

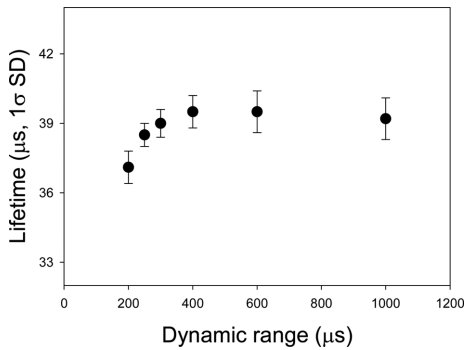


Fig. 5. The change of lifetime against the increase of dynamic range.

찰하였다. 광자극 펄스에 대한 의존성을 판단하기 위하여 펄스 주기는 200 μs에서부터 1,000 μs까지, 펄스 폭은 5 μs에서부터 60 μs까지 변화시키면서 각각의 조건에 따른 시간분해 광자극 냉광을 측정하였다.

Fig. 5는 펄스 폭을 10 μs로 고정했을 때 펄스 주기의 변화에 따른 고토양층 석영의 냉광수명 변화에 관한 그림이다. 광자극 펄스 주기를 200 μs에서부터 1,000 μs까지 증가시키는 동안 냉광수명은 오차를 고려했을 때 250 μs 이후에서 펄스 주기의 변화에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 또한 Fig. 6(a)은 펄스 주기를 250 μs로 고정했을 때 펄스 폭의 변화에 따른 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광 신호의 모양 및 냉광수명에 관한 그림이다. 광자극 펄스 폭을 5, 10, 20, 30, 60 μs로 증가시키며 시간분해 광자극 냉광을 측정된 결과, 각 펄스 폭에 따른 냉광 신호의 상대적 세기는 1.00, 4.55, 11.20, 16.60, 31.60으로 선형적으로 증가하였다. 또한 냉광수명은 평균 38.78±0.20 μs로 펄스 폭 증가와 관계없이 항상 일정한 값을 가졌다(Fig. 6(b)).

따라서 시간분해 광자극 냉광의 냉광수명은 펄스 주기와 펄스 폭을 250 μs와 10 μs로 고정했을 때 광자극 펄스 조건과 무관하며, 이 결과는 Chithambo의 연구결과¹²와도 일치하였다.

3.5. 냉광수명의 측정온도 의존성

석영의 냉광수명과 이의 측정온도에 대한 의존성을 이용하면 운동학 변수 중 열소광 활성화 에너지 ΔE와 thermal assistance 활성화 에너지 E_a를 결정할 수 있다. 열소광 현상은 측정온도가 높아짐에 따라 발광 재결합 중심(radiative recombination center)이 격자 진동에너지(phonon energy)를 흡수하여 비발광 중심으로 변

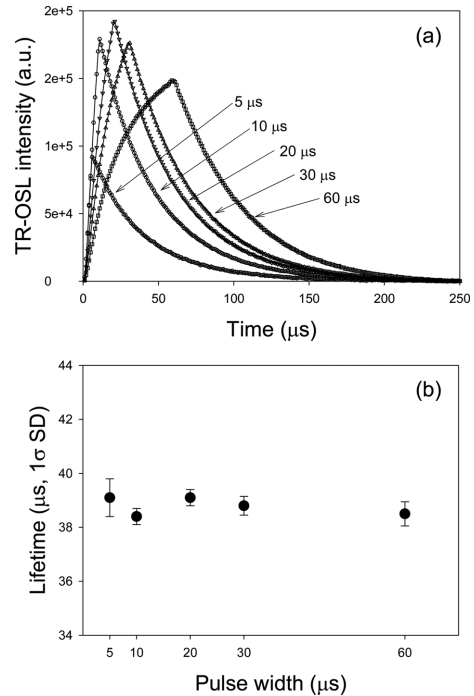


Fig. 6. The relationship between lifetime and optical pulse width measured over 100,000 sweeps and 250 °C dynamic range. (a) A typical example of TR-OSL signal against the change of pulse width, (b) The change of lifetime against the increase of the pulse width.

화하고 이에 따라 자유전자가 비발광 중심과 재결합할 확률이 높아져 냉광의 세기가 감소하는 현상이다. 또한 thermal assistance 현상은 열에 의한 격자 진동 에너지의 증가 때문에 덜에 포획된 전자가 보다 낮은 포톤 에너지에 의해 덜에서 방출되는 현상을 의미한다.⁸ 이 연구에서는 열처리된 고토양층 석영의 냉광수명과 이의 측정온도 의존성을 이용하여 열소광 활성화 에너지 ΔE와 thermal assistance 활성화 에너지 E_a를 결정하고, 이들을 기존에 보고된 결과와 비교하였다.

시간분해 광자극 냉광 측정을 위해 열처리된 고토양층 석영에 방사선량을 100 Gy 조사한 후 별도의 열전처리 없이 펄스 주기 250 μs, 펄스 폭 10 μs, 반복수 100,000번인 광자극 펄스를 가하였다. 측정온도 증가에 따른 시간분해 광자극 냉광 신호의 변화를 관찰하기 위해 측정온도를 30 °C에서 180 °C까지 30 °C씩 증가시키며 시간분해 광자극 냉광을 측정 후 식 (1)을 이용하여 냉광수명을 산출하였다. 각 측정온도에 대한 시간분해 광자극 냉광 세기와 냉광수명을 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)에 나타난 것과 같이 최대 세

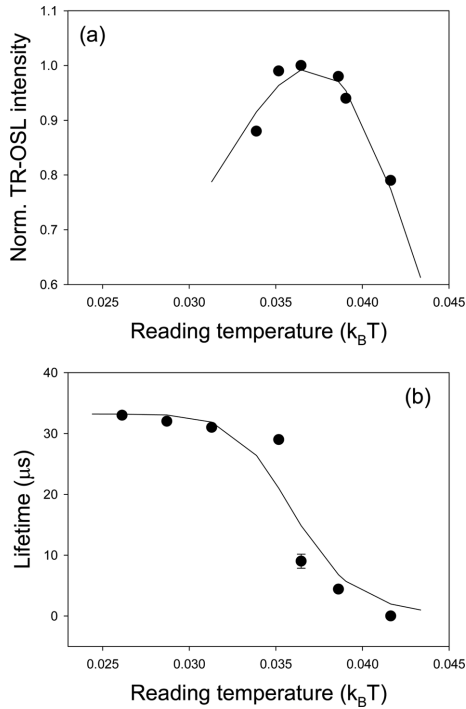


Fig. 7. Normalized TR-OSL intensity (a) and lifetime (b) as a function of reading temperature.

기를 이용하여 규격화한 시간분해 냉광 세기는 피크의 형태를 가졌으며, 이를 식 (2)의 특성함수를 이용하여 곡선접합 하였다. 또한 같은 방법으로 각 측정온도에 따른 냉광수명의 변화도 식 (3)을 이용하여 곡선 접합 하였다(Fig. 7(b)).

$$I(T) = \frac{I_0 \exp(-E_a/kT)}{1 + \nu \tau_{rad} \exp(-\Delta E/kT)} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{1}{1 + \nu \tau_{rad} \exp(-\Delta E/kT)} \quad (3)$$

이들 식에서 k 는 볼츠만 상수, ν 는 이탈진동수, τ_{rad} 는 절대온도 0 K에서의 냉광수명을 의미한다.

열처리된 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광 세기와 냉광수명을 곡선 접합하여 산출된 이탈진동수 ν , 열소광 활성화 에너지 ΔE , thermal assistance 활성화 에너지 E_a 를 Table 1에 정리하였다. 이 연구에서 산출된 고토양층 석영의 운동학 변수를 Table 1에서 언급된 기존의 연구 성과^{3-8,12,14,15}와 비교하였을 때 매우 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다. 따라서 산출된 고토양층 석영의 운동학 변수는 매우 신뢰할 수 있다고 판단된다.

Table 1. Kinetic parameters of the paleosol quartz annealed at 600 °C

	Results obtained from in this study	References
Sample	Paleosol quartz	
Frequency factor (s^{-1})	2.36×10^{12}	
		0.60^3
		0.64^4
		0.636 ± 0.013^5
Thermal quenching activation energy (eV)	0.60 ± 0.14	0.79 ± 0.02^6
		0.67^7
		0.64 ± 0.01^{12}
		0.77 ± 0.66^{14}
		0.63 ± 0.07^{15}
		0.05^4
		0.044^5
Thermal assistance activation energy (eV)	0.053 ± 0.029	$0.05 \sim 0.08^7$
		0.07 ± 0.01^{12}
		0.04 ± 0.01^{14}
		0.06^{15}

4. 결 론

시간분해 광자극 냉광은 펄스를 이용한 짧은 시간 동안의 광자극과 이로 인해 방출되는 냉광을 시간적으로 구분하여 측정된다. 이 연구에서는 최근 자체 개발한 광자극 냉광 측정시스템을 이용하여 600 °C에서 열처리 된 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광을 측정 후 단일지수함수로 곡선 접합하여 냉광수명을 산출하였다. 냉광수명의 열처리 의존성, 조사선량 의존성, 광자극 펄스 의존성을 모두 고려한 결과, 열처리된 고토양층 석영의 시간분해 광자극 냉광은 방사선량 100 Gy 조사 후 별도의 열처리 없이 펄스 주기 250 μs , 펄스 폭 10 μs , 반복수 100,000번인 광자극 펄스를 가하여 측정할 때 정확한 냉광수명이 산출됨을 알 수 있었다. 냉광수명의 측정온도 의존성으로부터 열소광 활성화 에너지 ΔE , thermal assistance 활성화 에너지 E_a 는 각각 0.60 ± 0.14 eV, 0.053 ± 0.029 eV로 산출되었으며, 이는 기존의 연구 성과와 매우 잘 일치하였다. 그러므로 이 연구에서 산출된 고토양층 석영의 운동학 변수 값은 매우 신뢰할 수 있다고 판단된다. 또한 이 연구에서 도출된 결과는 향후 석영의 광자극 냉광 방출 모델 정립에 기여하리라 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구 조성비(관리번호-520160283)와 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B03029608).

References

1. L. Botter-Jensen, S. W. S. McKeever, and A. G. Wintle, 'Optically stimulated luminescence dosimetry', Elsevier Science BV, Amsterdam, 2003.
2. M. L. Chithambo, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 1874-1879 (2007).
3. S. W. S. McKeever, L. Botter-Jensen, N. Agersnap Larsen, and G. A. T. Duller, *Radiat. Meas.*, **27**, 161-170 (1997).
4. D. J. Huntley, M. A. Short, and K. Dunphy, *Can. J. Phys.*, **74**, 81-91 (1996).
5. A. S. Murray and A. G. Wintle, *Radiat. Meas.*, **29**, 65-79 (1998).
6. R. M. Bailey, *Radiat. Meas.*, **32**, 233-246 (2000).
7. J. S. Singarayer, 'Linearly modulated optically stimulated luminescence of sedimentary quartz: physical mechanisms and implications for dating' Ph. D. Dissertation, University of Oxford, 2003.
8. M. J. Kim, K. W. Song, and D. G. Hong, *Sae Mulli*, **53**, 172-178 (2006).
9. D. G. Hong and M. J. Kim, *J. Radiat. Prot. Res.*, **42**, 69-76 (2017).
10. M. J. Kim, J. H. Choi and D. G. Hong, *Geoscience*, **15**, 65-70 (2011).
11. D. G. Hong and M. J. Kim, *J. Korean Phy. Soc.*, **68**, 1120-1125 (2016).
12. M. L. Chithambo, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 1880-1889 (2007).
13. M. J. Aitken, 'An introduction to optical dating', Oxford University Press, London, 1998.
14. R. B. Galloway, *Radiat. Meas.*, **35**, 67-77 (2002).
15. M. L. Chithambo, *Radiat. Meas.*, **37**, 167-175 (2003).