

<Short Note>

석영의 광여기루미네선스 신호 특성을 이용한 제4기 퇴적환경 해석

박하은¹ · 최주아^{1,2} · 최진혁² · 정대교¹ · 김진철^{2,*}

¹강원대학교 지질·지구물리학과

²한국지질자원연구원

요 약

경상북도 경주시 배동의 경애왕릉 부근에는 동쪽에 위치하는 남산과 서쪽을 흐르는 형산강 사이에 단차가 존재하는 미고화 퇴적층이 발달해 있다. 남산은 주로 신생대 초기 화강암으로 구성되며, 형산강 지역은 중생대 세일이 주를 이룬다. 석영을 이용한 광여기루미네선스(OSL: Optically Stimulated Luminescence) 신호의 물리적인 특성은 석영의 기원과 퇴적환경에 따라 차이를 보이는 경우가 있다. 이번 연구에서는 미고화 퇴적층의 퇴적물 기원 및 퇴적환경을 규명하기 위하여 연구단면 퇴적층을 비롯하여 인접한 현생 선상지와 현생 하천 퇴적물에서 각각의 석영을 분리하여 CW (continuous wave) OSL과 LM (linearly modulated) OSL의 신호 특성을 비교 분석하였다. 연구결과, 연구단면 퇴적층에서 획득한 석영의 OSL 신호는 화강암으로 이루어진 남산의 선상지 기원 석영보다 퇴적암으로부터 기원한 형산강 하천 기원 석영의 OSL 신호와 매우 유사한 특징을 보였다. 이는 연구단면 퇴적층이 과거 형산강의 하안 단구 퇴적층임을 지시한다. 본 연구결과는 퇴적물의 기원과 퇴적환경에 따라 다르게 나타나는 OSL 신호 특성이 퇴적 환경 해석에 이용될 수 있다는 가능성을 제시한다.

주요어: 광여기루미네선스, 퇴적환경, OSL 신호특성

Ha Eun Park, Jooah Choi, Jin-Hyuck Choi, Daekyo Cheong and Jin Cheul Kim, 2018, Interpretation of Quaternary depositional environment using quartz OSL characteristics. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 4, p. 425-431

ABSTRACT: There is the unconsolidated depositional unit between Mt. Nam in the east side and Hyeongsan river in the west side near the royal tomb of King Gyeongae located on the Bae-dong, Gyeongju. Mt. Nam is mainly composed of the early Cenozoic granite and the Hyeongsan River area mainly consists of the Mesozoic shales. The physical properties of optically stimulated luminescence (OSL) signals using quartz may vary depending on their origin and the depositional environments. In this study, we measured CW (continuous wave)-OSL and LM (linearly modulated)-OSL signal properties of quartz grains from the studied section, modern fan and modern fluvial sediments to investigate and compare the origin of sediments and depositional environment of the study area. As a result, quartz OSL signals obtained from the studied section are similar to those of the modern fluvial sediments derived from sedimentary rocks rather than those of the alluvial fan sediments which are originated from granite. This indicates that it is the depositional unit of fluvial terrace formed by the Hyeongsan River. This study suggests that the characteristics of OSL signals can be used to interpret the depositional environment and origin of sediments.

Key words: optically stimulated luminescence, depositional environment, luminescence characteristics

(Ha Eun Park, Daekyo Cheong and Jooah Choi, Division of Geology & Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Jooah Choi, Jin-Hyuck Choi and Jin Cheul Kim, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

퇴적물에 가장 흔한 조암 광물 중 하나인 석영은

단순한 화학 조성과 격자구조로 다른 광물들에 비해 연대측정에 적합한 광여기루미네선스(OSL: optically stimulated luminescence) 신호 특성을 보이기 때

* Corresponding author: +82-42-868-3137, E-mail: kjc76@kigam.re.kr

문에 다양한 환경의 제4기 퇴적층 연대측정에 보편적으로 사용되고 있다. 하지만, 서로 다른 OSL 신호의 물리적 특성들을 보이는 석영입자들이 보고되었고, 그러한 신호 특성들은 석영의 기원과 퇴적환경에 따라 다양하다고 해석되었다(Steffen *et al.*, 2009; Durcan and Duller, 2011; Jeong and Choi, 2012). Jeong and Choi (2012)는 화강암질 암체 및 이들로부터 유래한 퇴적물 등 다양한 기원의 석영에서 CW (continuous wave) OSL과 LM (linearly modulated) OSL을 측정하여 시료별로 OSL 신호를 구성하는 각각의 성분(component) 특성이 변화하는 것을 확인하였다. 화강암으로부터 유래한 석영의 루미네선스 신호는 빛에 민감하지 않은 느린 성분(slow component)의 비율이 높은 반면, 퇴적암으로부터 유래한 석영은 빛에 민감한 빠른 성분(fast component)의 비율이 상대적으로 높은 특징을 보였다. 이러한 석영의 루미네선스 특성들은 석영을 포함하는 퇴적물의 기원 및 퇴적환경을 유추하는데 이용될 수 있다.

이번 연구지역은 경상북도 경주시 배동 일대로 위치하며 동쪽으로는 남산이 자리하고 서쪽으로는 형산강이 흐르는 지형적 특징을 보인다. 남산은 주로 신생대 초기 화강암으로 구성되며, 형산강이 흐르는 하천을 중심으로는 중생대 백악기의 세일이 주를 이루며 일부 화산암들이 분포한다. 연구지역은 지형적으로 선상지 말단면에 해당하지만 하천 작용에 의해 형성된 하안단구와 구분하기 힘들다. 연구지역을 구

성하는 퇴적층이 선상지 퇴적층이라면 퇴적물은 동쪽의 남산화강암으로부터 기원했을 것이며, 형산강 기원이라면 주로 퇴적암으로부터 기원했을 것이다. 이번 연구에서는 지형적 특징만으로 퇴적환경을 유추하는데 한계가 있는 퇴적층을 대상으로 석영의 기원에 따른 루미네선스 특성들을 이용하여 퇴적 환경을 해석하고자 하였다.

2. 연구 지역

연구지역은 경상북도 경주시 배동 일대로, 크게 중생대 백악기 퇴적암류와 이를 관입하는 신생대 화강암류로 나눌 수 있다(그림 1). 동쪽에 분포하는 남산화강암류는 51 ± 1.4 Ma (Rb-Sr age)와 49.3 ± 0.9 Ma (K-Ar age)의 연대 분포를 보인다(Yun and Hwang, 1990). 형산강 유역은 신라층군 대구층에 속하는 중생대 세일이 분포하며 세일과 화강암체의 접촉부에는 세일의 열 접촉변성작용으로 인해 생성된 혼펠스가 함께 나타난다(Kim and Jin, 1971). 연구지역 일대는 양산단층과 울산단층이 인접하는 지역으로 2016년 9.12 지진의 진앙지 인근에 해당한다.

3. 연구 방법

이번 연구에서는 연구지역을 대상으로 LiDAR (Light Detection and Ranging) 영상 기반의 정밀 지형분석

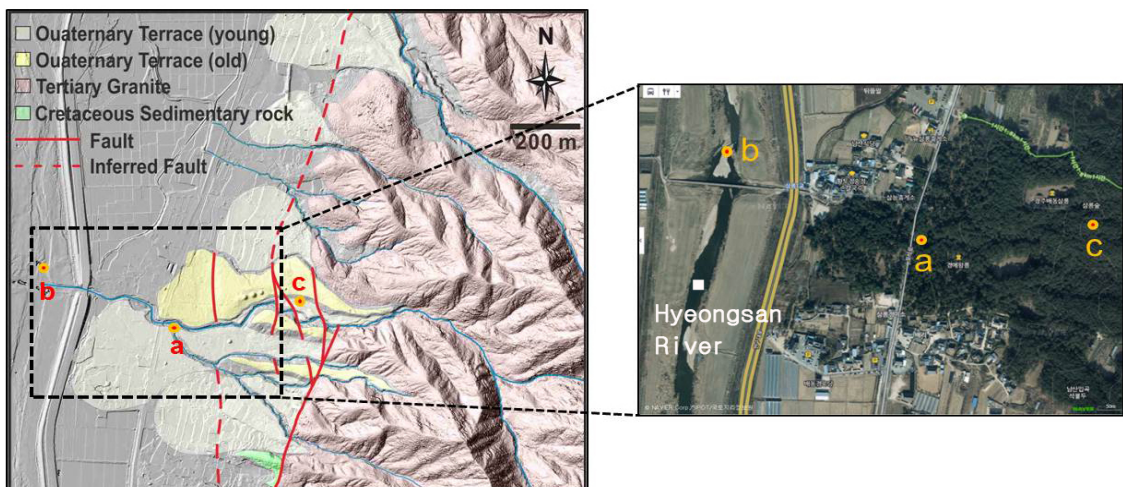


Fig. 1. LiDAR and satellite images of study area. Red dots indicate the OSL sampling sites. a: terrace sediment (17GW series), b: modern fluvial sediment, c: modern fan sediment.

을 실시하였다. 이를 바탕으로 시료채취 단면이 위치하는 경애왕릉으로부터 서쪽 약 60 m 지점을 선상지 말단면으로 해석하였다(그림 1: 시료채취 지점 a). 퇴적단면에서의 OSL 시료 채취는 길이 30 cm, 지름 6 cm의 스틸 관을 층리와 평행하게 삽입하여 시료가 빛에 노출되지 않도록 처리하였다(그림 2). 시료는 한국지질자원연구원의 암실로 운반하여, 루미네선스가 안정한 파장의 빛의 조건(660 nm)에서 관을 절개하였으며, 등가선량 측정에는 관 중앙부의 시료를 사용하였다. 빛에 노출되었을 가능성이 있는 관의 양 끝부분 퇴적물은 연간선량(dose rate)을 측정하는 데 사용하였다. 이번 연구에서는 등가선량 측정을 위하여 90-250 μm 크기의 석영을 다음과 같은 전처리 실험을 통하여 획득하였다. 먼저, 체(sieve)를 이용하여 90-250 μm 크기의 시료를 회수한 후 시료 내의 탄산염 입자와 유기물을 제거하기 위하여 10% 염산(HCl)과 33% 과산화수소(H_2O_2)로 각각 1시간 이상 처리하였다. 중액(Sodium Polytungstate, SPT)을 사용하여 비중이 큰 광물($\rho > 2.62 \text{ g/cm}^3$)을 획득한 후, 석영 이외의 광물을 제거하기 위하여 48~51% 불산(HF)

으로 1시간 처리하였다. 불산 처리 후 시료에 남아있는 불화물(fluoride) 제거를 위하여 10% 염산으로 최소 1시간 이상 세척하였다. Nd 자석을 이용하여 자성광물들을 분리한 후 건식 체질(dry sieving)을 통하여 완전히 제거되지 않은 석영 이외의 광물을 제거하였다. 석영의 등가선량은 한국지질자원연구원의 TL/OSL DA-20 reader 장비를 사용하여 단일시료 재현법(SAR protocol: Murray and Wintle, 2000)으로 측정하였다. 이 장비는 0.089 Gy/sec 선량의 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 베타 선원이 설치되어 있으며, Blue LEDs ($470 \pm 20 \text{ nm}$) 광원을 조사(irradiation)하여 얻어진 OSL 신호는 광전자 증배관(photomultiplier tube)으로 검출되었다. 이 검출기 앞에는 5 mm와 2.5 mm 두께의 Hoya U-340 필터가 장착되어 있다. 석영의 OSL 신호는 90-250 μm 크기의 입자를 220°C에서 10초간 열 전처리(preheat)한 후 Blue-LEDs를 이용하여 125°C에서 100초 동안 측정하였으며, 160°C 열 차단(cut-heat) 온도가 사용되었다. 단일시료재현법에 따른 등가선량 측정 시 민감도 보정이 적절하게 이루어졌는지 확인하기 위하여 재측정 비율(recycling ratio)과 회귀율(recuperation)을 측정하였으며, OSL에 영향을 미치는 장석의 오염 여부는 광여기루미네선스 적외선 감쇄 비율(OSL IR depletion ratio)을 측정하여 확인하였다. 장석의 오염이 확인되면 48-51% 불산으로 40분간 추가 처리하여 장석의 영향을 배제했다. 연간선량은 한국지질자원연구원에 설치된 고분해능 감마스펙트로미터를 이용하였다. 석영의 OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정하게 유지한 채로 측정하는 CW-OSL과 여기 광원의 세기를 일정시간동안 선형적으로 증가시키며 측정하는 LM-OSL을 측정하여 루미네선스 특성을 비교 분석하였다.

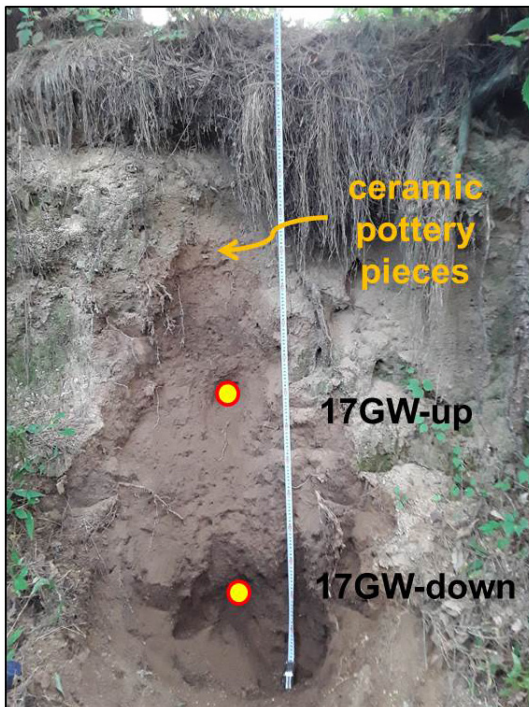


Fig. 2. Photograph of studied section showing the location of OSL samples.

4. 결과 및 토의

4.1 퇴적시기

OSL 연대측정 결과, 퇴적층 상부(17GW-up)는 $4.1 \pm 0.3 \text{ ka}$, 하부(17GW-down)는 $6.1 \pm 0.3 \text{ ka}$ 의 연대 결과를 얻었다(표 1). 또한 지표로부터 약 80 cm 하부의 퇴적층 내에서는 신라시대(BC57~AD935) 자기편들이 확인되었다(그림 2). 자기편들의 편년을 약 1.0~2.0 ka 범위로 추정할 경우, 퇴적층의 형성 시기는 표층으로부터 약 1.6 m까지의 구간이 약 6.0 ka 이내에 형

성되었음을 알 수 있다. 이번 OSL 연대결과는 층서적으로 서로 역전 양상이 관찰되지 않았으며 연대측정에 매우 적합한 루미네선스 특성들이 관찰되었기 때문에 신뢰할 수 있는 연대결과라고 생각된다.

4.2 루미네선스 특성과 퇴적물 기원

CW-OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정하게 유지하면서 얻어지는 루미네선스 시그널로써 감쇄곡선(decay curve)의 형태로 나타낸다. CW-OSL 신호를 일차 반응역학(first-order kinetics)으로 가정할 때 3~4개의 성분(components)으로 분리할 수 있다. LM-OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정시간동안 선형으로 증

가시키면서 관찰되는 루미네선스 피크들을 빛에 민감하며 광이온화 단면적(σ : photoionisation cross-section)이 큰 순서대로 성분을 분리할 수 있다(Bulur, 1996; Bøtter-Jensen *et al.*, 2003). CW-, LM-OSL의 성분 분리에 관한 수식 및 이론은 Choi *et al.* (2006, 2008)에 자세히 소개되어 있다.

Jeong and Choi (2012)에 따르면 신선한 퇴적암에서 기원한 석영의 OSL 성분은 CW-, LM-OSL 신호에서 대부분 빠르게 감쇄하는 성분(fast component)이 우세하다(그림 3a, 3b). 반면, 신선한 화강암으로부터 기원한 석영은 CW-, LM-OSL 신호에서 모두 느리게 감쇄하는 성분(slow component)이 주를 이

Table 1. OSL ages and dose rates information for the 17 GW series. Data were derived from sand-sized quartz (90-250 μm).

Sample	Water Contents (%)	Depth (cm)	Alpha Dose (Gy/ka)	Beta Dose (Gy/ka)	Gamma Dose (Gy/ka)	Cosmic Dose (Gy/ka)	Dose Rate (Gy/ka)	No. of discs	Equivalent Dose (Gy)	Age (ka)
17GW-up	5.6 $\pm$ 5	100	-	3.75 $\pm$ 0.25	2.31 $\pm$ 0.14	0.18 $\pm$ 0.01	6.24 $\pm$ 0.29	6 (6)	25.4 $\pm$ 1.3	4.1 $\pm$ 0.3
17GW-down	7.1 $\pm$ 5	160	-	3.17 $\pm$ 0.21	1.98 $\pm$ 0.12	0.16 $\pm$ 0.01	5.31 $\pm$ 0.24	6 (6)	32.2 $\pm$ 0.8	6.1 $\pm$ 0.3

* Conversion to dose rates used the data presented by Olley *et al.* (1996).

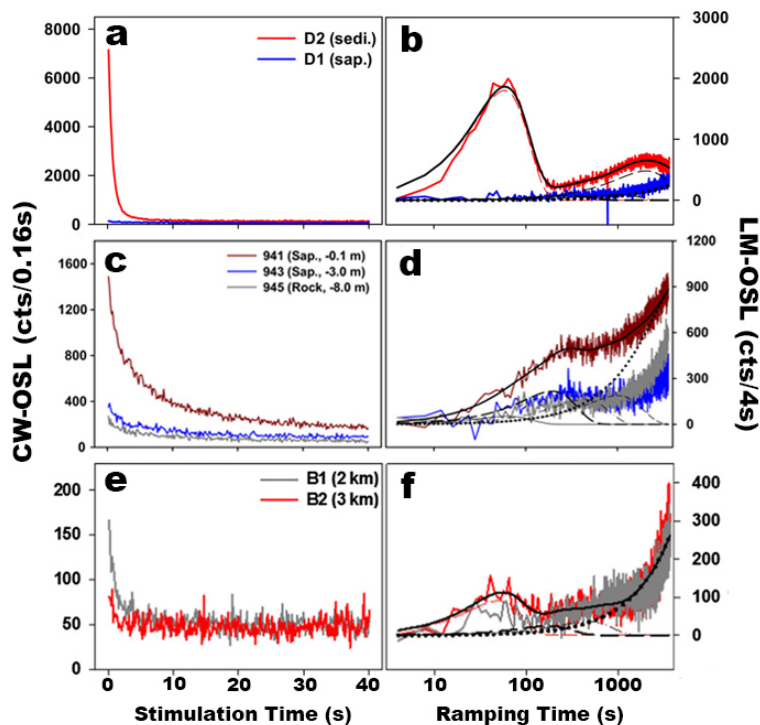


Fig. 3. Quartz CW-, LM-OSL signals in quartz (Jeong and Choi, 2012). D1 and D2 samples were collected from the saprolite and valley sediments in the metamorphic terrane (a, b). 941, 943 and 945 samples were collected from Cretaceous granite bodies (c, d). B1 and B2 samples were taken from the beds of small fluvial sediments (e, f).

룬다(그림 3c, 3d). 기원지로부터의 이동 거리 역시 OSL 신호에 영향을 미치는데, 중생대 화강암을 기반암으로 하는 지역에서 풍화되어 기원지로부터 약 2 km 정도 이동한 퇴적물의 석영 OSL 신호는 빠른 성분과 느린 성분이 혼합되어 나타나는 특징을 보인다(그림 3e, 3f). 이는 느린 성분이 우세한 화강암 기원의 석영일지라도 기원지로부터의 이동 거리가 증가함에 따라 루미네선스 시그널의 민감도 변화(sensitivity change)가 이루어지면서 빠른 성분이 증가하였음을 나타낸다.

17GW-up 그리고 down 시료들의 CW-OSL 신호는 빠르게 감쇄하는 특징을 보였으며, 세 개의 components로 분리한 결과, 빠른 성분은 약 91~97%의 비율로 가장 우세하고, 중간(medium) 그리고 느린 성분은 각각 2~8%와 0.6~0.9%의 비율을 차지했다(그림 4e, 4g; 표 2). 17GW-up 그리고 down 시료들의 LM-OSL 신호는 빠른 성분이 우세하며 느린 성분은 일부 관찰되었다(그림 4f, 4h). 이러한 OSL 신호 결과를 Jeong and Choi (2012)의 결과와 비교해보았을 때 빠른 성분이 우세한 특징을 보이는 퇴적암 기원 석영의 OSL

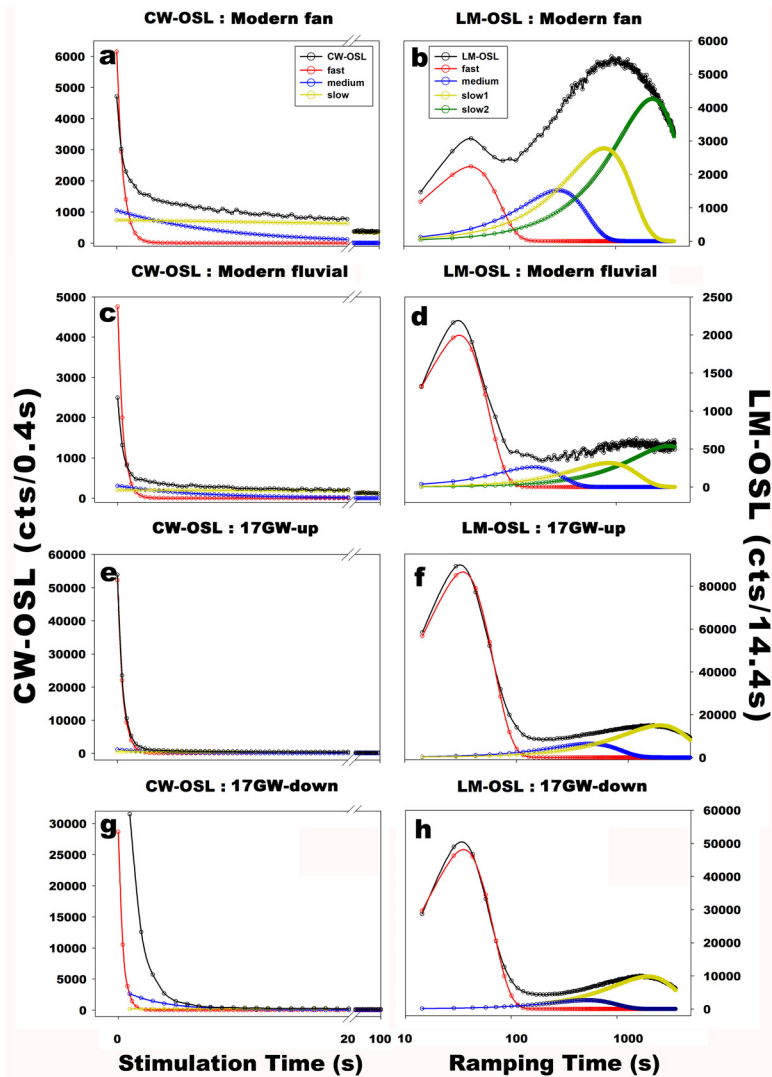


Fig. 4. CW-, LM-OSL signals of quartz derived from 17GW-up, -down, modern fan and modern fluvial sediments. In both CW-OSL and LM-OSL, clear fast OSL signals are observed in 17GW-up, -down (e, f, g, h) and modern fluvial sediments (c, d). But the OSL signals of modern fan sediments were dominated by slow components (a, b).

Table 2. Component ratio informations from CW-OSL component separation.

	Fast Component Ratio (%)	Medium Component Ratio (%)	Slow Component Ratio (%)	Total (%)
17GW-up	97.04	2.08	0.88	100
17GW-down	90.99	8.38	0.63	100
Modern fan sediments	77.47	13.21	9.32	100
Modern fluvial sediments	90.34	5.84	3.82	100

신호(그림 3a, 3b) 특성과 매우 유사하였다.

17GW-up 그리고 down 시료들의 석영 OSL 신호 특성이 어떠한 환경의 퇴적물과 가장 유사한지를 알아보기 위하여 연구 지역 퇴적층과 인접한(약 300 m 이내) 현생 형산강 하천 퇴적물(modern fluvial sediments)과 현생 남산 선상지 퇴적물(modern fan sediments)의 석영 OSL 신호 특성을 비교 분석하였다(그림 1). 현생 선상지, 현생 하천 시료의 CW-OSL 성분 분리 결과, 현생 하천 석영의 CW-OSL 빠른 성분 비율은 약 90%(그림 4c)로써 17GW-up 그리고 down 시료들의 빠른 성분 비율과 유사한 값을 보인 반면, 현생 선상지 석영의 CW-OSL 값은 빠른 성분의 비율이 약 77%(그림 4a)로, 17GW-down과 현생 하천 석영보다 현저하게 낮은 값을 보였다(표 2). 현생 하천 석영의 LM-OSL 신호는 모두 빠른 성분이 우세하였으나(그림 4d), 현생 선상지 석영의 LM-OSL 은 모두 중간 또는 느린 성분이 우세하였다(그림 4b). Jeong and Choi (2012)의 결과(그림 3)와 비교 하였을 때 현생 선상지 석영의 OSL 특성(그림 4a, 4b)은 화강암으로부터 기원한 석영의 OSL 특성(그림 3e, 3f)과 매우 유사한 반면, 현생 하천 석영의 OSL 특성(그림 4c, 4d)은 퇴적암으로부터 기원한 석영의 OSL 특성(그림 3a, 3b)과 유사한 패턴을 보였다.

연구지역은 동쪽으로는 화강암으로 이루어진 남산이 자리하고 서쪽으로는 퇴적암이 주를 이루는 기반암 위에 형산강이 흐르고 있다. 현생 퇴적물로부터 분리한 석영에서의 OSL 특성은 선상지 퇴적물이 주로 남산 화강암으로부터 유래되었고 하천 퇴적물은 주로 퇴적암으로부터 기원하였을 것으로 해석된다. 이는 Jeong and Choi (2012)의 석영 기원별 OSL 특성값과도 잘 일치하는 결과이다. 연구지역은 지형적 해석으로는 선상지 말단면에 해당하지만 형산강과도 인접하여 하안 단구와 구분이 어렵다. 퇴적물과 퇴적층의 층서적 해석 역시 일반적인 선상지성 내지

하성 퇴적층의 특성을 뚜렷이 보이지 않기 때문에 야외조사와 영상조사를 통한 해석에는 한계가 있다. 이번 연구지역의 미고화 퇴적층은 지형적 요소들로 미루어 보았을 때 연구지역 퇴적층이 남산으로부터 기원한 선상지 말단면으로 보였지만, 퇴적층 내 석영의 OSL 신호 분석 결과, 형산강의 하천 작용으로 형성된 하안단구일 가능성이 높은 것으로 판단된다. 이 연구 결과는 퇴적층의 과거 퇴적 환경 또는 기원지 해석시 퇴적층 내 석영의 OSL 신호 특성을 활용할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

이번 연구에서는 경주시 배동 경애왕릉 부근의 미고화 퇴적층을 대상으로 석영의 OSL 신호 특성을 이용하여 퇴적물의 기원과 퇴적 환경을 유추하였다. 퇴적 환경에 따른 OSL 신호 특성을 비교 분석하기 위하여 연구단면 퇴적층과 인접한 현생 선상지와 현생 하천 퇴적물에서 석영을 분리하여 OSL 신호 특성을 파악하였다. 연구 결과, 연구단면 퇴적층은 빠른 성분의 비율이 높으며 현생 하천의 석영과 유사한 OSL 신호 특성을 보였다. 반면, 현생 선상지 석영은 빠른 성분의 비율이 상대적으로 낮으며 중간 또는 느린 성분이 우세한 특성을 보였다. 이는 Jeong and Choi (2012)의 기원에 따른 석영의 OSL 특성 차이와도 부합하는 결과이다. 연구지역의 미고화 퇴적층은 지형적으로 남산에서 기원한 선상지성 퇴적층으로 해석되지만 OSL 신호 특성으로 해석할 경우 형산강의 하천 작용으로 형성된 하안 단구일 가능성이 높은 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 R&D 과제인 “국

토 대단층계(양산단층 중부지역) 위험요소 평가연구 (GP2018-017)”에 의해 수행되었습니다. 유익한 심사를 해주신 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Bøtter-Jensen, L., McKeever, S.W.S. and Wintle, A.G., 2003, Optically stimulated luminescence dosimetry. Elsevier, 355 p.
- Bulur, E., 1996, An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment. *Radiation Measurements*, 32, 141-145.
- 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., Lim, H.S., Yoon, H.I., Cheong, C.-S., Im, C.-B., Kim, J.-W. and Chang, H.-W., 2008, Optical Dating of sorted circles in King George Island, Shetland Islands, West Antarctica as a potential time marker for local glacial retreat. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 523-539 (in Korean with English abstract).
- Durcan, J.A. and Duller, G.A.T., 2011, The fast ratio: A rapid measure for testing the dominance of the fast component in the initial OSL signal from quartz. *Radiation Measurements*, 46, 1065-1072.
- Jeong, G.Y. and Choi, J.-H., 2012, Variations in quartz OSL components with lithology, weathering and transportation. *Quaternary Geochronology*, 10, 320-326.
- Kim, N.J. and Jin, M.S., 1971, 1:50,000 the geological map of Moryang sheet, Geological survey of Korea (in Korean).
- Murray, A.S. and Wintle, A.S., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Olley, J.M., Murray, A.S. and Roberts, R.G., 1996, The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burial dose rates in fluvial sediments. *Quaternary Science Reviews*, 15, 751-760.
- Steffen, D., Preusser, F. and Schlunegger, F., 2009, OSL quartz age underestimation due to unstable signal components, *Quaternary Geochronology*, 4, 353-362.
- Yun, S.-H. and Hwang, I.-H., 1990, Petrology and Geochemical Characteristics of the Granitic Rocks in Namsan Area, Kyeongju. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 11, 51-66 (in Korean with English abstract).

Received : April 12, 2018

Revised : August 21, 2018

Accepted : August 24, 2018