수렴단층노두 해안단구 퇴적층의 OSL 연대에 대한 재고찰: 단일입자 OSL 연대측정 연구

허서영¹ · 최정현¹ · 홍덕균^{2*}

¹한국기초과학지원연구원 환경과학연구부, ²강원대학교 물리학과

Revisiting the OSL Ages of Marine Terrace Sediments at Suryum Fault Site, Gyeongju, South Korea: Single Grain OSL Dating

Seoyoung Heo¹, Jeong-Heon Choi¹, and Duk-Geun Hong^{2*}

¹Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Ochang Center, Chungbuk 363-883, Korea

²Department of Physics, Kangwon National University

요 약: 이 논문에서는 경주시 양남면에 분포하는 해발고도 약 45 m의 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층의 형성시기를 추정하기 위하여, 퇴적층을 구성하고 있는 석영에 대한 단일입자 OSL(Single Grain Optically Stimulated Luminescence) 연대측정을 실시하였다. 실험에 사용된 총 1200개의 석영입자 중, 93개의 입자가 연대측정에 적합한 OSL 신호특성을 보였으며, 이들의 등가선량은 50-610 Gy까지 넓은 분포를 보인다. 이 자료를 중심연대모델(Central Age Model)과 최소연대모델(Minimum Age Model)을 이용하여 분석하면, 각각 83 ± 4 ka와 60^{+3}_{-7} ka의 연대가 도출되지만, 이들 연대는 MIS 5a시기로 보고된 기존의 제2해안단구의 OSL 연대와 층서적으로 불일치한다. 단일입자 OSL 분석결과들을 혼합연대모델(Finite Mixture Model)에 적용하면, 분석된 입자들 중 $6 \pm 4\%$ 의 석영입자가 MIS 7의 퇴적시기(194 ± 24 ka)를 지시함을 알 수 있다. 결론적으로, 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층이 MIS 7 시기에 형성되었을 가능성을 배제할 수 없으며, 이 퇴적층은 일반적으로 적용되는 다입자 OSL(multiple grain OSL) 연대측정법을 적용하기에 적합하지 않은 시료로 판단된다.

핵심어: 수렴단층, 해안단구, 단일입자 OSL 연대측정, 연대모델, MIS 5a, MIS 7

Abstract: In this paper, we report new OSL ages of the marine terrace sediments at Suryum fault site, using single grains of quartz, and briefly discuss their chronological implications on the timing of terrace formation along the southeastern coast of Korea. Of 1200 grains measured, 93 quartz grains were found to have OSL properties suitable for dating, the equivalent dose (D_e) values of which varied significantly, ranging from 50 Gy to 610 Gy with the overdispersion of $30 \pm 4\%$. Applied to the Central Age Model (CAM) and Minimum Age Model (MAM), these quartz grains showed the OSL ages of 83 ± 4 ka and 60^{+3}_{-7} ka, respectively, both of which are stratigraphically inconsistent with the previously reported OSL ages of lower 2nd terrace (MIS 5a; ~ 80 ka). However, Finite Mixture Model (FMM) revealed that a small fraction of the measured quartz grains ($6 \pm 4\%$) were of the ages (194 ± 24 ka) corresponding to MIS 7. Conclusively, based on single grain OSL ages, it would be prudent not to exclude the possibility that the marine terrace sediments at Suryum fault site have formed during MIS 7. Further, our single grain OSL ages imply that multiple grain(single aliquot) OSL dating methods are not applicable to the marine sediments at Suryum fault site.

Keywords: Suryum fault, Marine terrace, Single Grain OSL dating, Age Models, MIS 5a, MIS 7

*Corresponding author

Tel: 033-250-8473

E-mail: dghong@kangwon.ac.kr

서론

한반도 남동해안에는 지난 제4기 동안 해수면의 변화를 지시하는 여러 단의 해안단구들이 고도를 달리 하며 뚜렷하게 발달하고 있다(Kim, 1973; Kim *et al.*, 1998; Choi, SJ *et al.*, 2008). 1980년대까지 이들 해안단구에 대한 연구는 주로 남동해안을 따라 발달하는 각 지역의 단구형성의 본질을 이해하기 위한 작업들, 즉, 각 단구의 구정선 고도를 비롯한 공간적 분포, 단구면과 이를 피복하고 있는 퇴적층에 대한 퇴적학적 연구, 단구 상호간의 대비를 통한 편년작업과 이를 바탕으로 한 과거 해수면 변동에 대한 연구가 주를 이루었으며(예. Lee, 1985, 1987), 아직도 학자마다 단구의 분류 및 명칭에 대해 이견이 있기는 하지만, 대체로 해발고도 5 m 미만의 제1단구, 10-20 m의 제2단구, 20-40 m의 제3단구, 40-60 m의 제4단구, 70-80 m의 제5단구 등, 다섯 개 내지 여섯 개의 단구가 보고되었다(Kim *et al.*, 1998). 1990년대 말, 이들 해안단구 중 제3단구를 절단하고 있는 시대 미상의 단층(수렴단층, 읍천단층)이 보고되면서(Lee *et al.*, 1999), 해안단구 연구는 남동해안의 제4기 동안의 지구조운동 및 융기율과 관련하여 많은 주목을 받게 되었다.

주지하는 바와 같이, 현재 야외에서 관찰되는 해안단구들은 지구가 상대적으로 온난했던 간빙기(interglacial) 혹은 아간빙기(interstadial)에 형성된 것으로 판단되며, 각 간빙기 및 아간빙기의 전지구적 해수면 수준은 이미 잘 알려져 있기 때문에(Chappell and Shackleton, 1986), 해안단구 형성시기에 대한 정확한 편년작업은 해당 지역의 지구조운동을 이해하고, 융기율을 추정하는 데에 매우 중요하다. 해안단구의 형성시기를 이해하기 위한 연대측정법으로는 우라늄계열 비평형법과 방사성탄소법 등 여러 방법이 있지만(Cheong, 2002), 연대측정 대상물질의 제한 등으로 인해서 최근에는 광여기루미네선스 연대측정법(Optically Stimulated Luminescence dating; OSL 연대측정법)이 널리 사용되고 있다.

Choi *et al.*(2003a, b, 2009)은 남동해안에 분포하는 해안단구 퇴적층에 대한 OSL 연대측정을 실시하여, 감포-정자리에 분포하는 제2단구(해발고도 약 15-20 m)와 포항 용한리의 제3단구(해발고도 약 30 m)에서 각각 MIS 5a(~80 ka)시기와 MIS 5e(~125ka)에 해당하는 연대결과를 보고하였다. 또한, MIS 5a시기

의 OSL 연대를 보이는 감포-정자리의 제2단구의 고도가 동일한 연대의 정자리-기장지역 제2단구(약 10 m)보다 체계적으로 높은 것을 관찰하고, MIS 5a 시기 이후, 이 두 지역 사이에 부동용기가 있었을 가능성을 제시하였다. 이후, Choi, SJ *et al.*(2008)은 이들 해안단구에 대한 연대측정결과(OSL, 방사성탄소연대측정, 고지자기연대)를 이용하여 울산단층과 감포리니어먼트(Gampo Lineament)로 구획된 지역(월성블록)이 주변 지역보다 융기율이 높았음을 보고하였다(그림 1).

Lee *et al.*(1999)이 보고한 바와 같이 경주시 양남면 수렴리에서 관찰되는 수렴단층은 해발고도 약 45 m의 제3단구에서 발달하고 있는데, 이 단층의 운동시기는 월성블록(그림 1)의 상대적으로 높은 융기율의 이해와 제4기 동안 한반도 남동해안의 지각안정성(local crustal stability) 평가에 매우 큰 중요성을 지닌다. 지난 10여년 동안 수렴단층의 운동시기를 밝혀내기 위한 여러 노력이 있었으며, 특히 수렴단층에 의해 절단된 해안단구 퇴적층의 연대를 알아내기 위

Fig. 1. The location of Suryum Fault. Also shown are the three tectonic blocks (Daebo, Wolseong and Gori Block from north to south), suggested by Choi, SJ *et al.*(2008) (modified from Choi *et al.*, 2009). GF and UF represent Gampo and Ulsan Faults, respectively.

하여 광범위한 OSL 연대측정 연구가 진행되었다. Ree *et al.*(2003)은 단층 하반의 해변층으로부터 32-58 ka의 OSL 연대를 보고하였고, Choi *et al.*(2009)은 단층하반(Ree *et al.*(2003)의 시료채취 장소와 동일한 지점)과 단층상반에서 각각 68-92 ka와 87 ka의 OSL 연대를 보고하였다. 하지만, 이들 연대 모두 제2단구의 퇴적연대가 MIS 5a시기임을 인정한다면 층서적으로 설명하기 어려운 단점이 있다.

기존의 OSL 연대는 모두 모래크기(90-250 μm) 석영입자 수 천개로부터 방출되는 OSL 신호를 사용한 결과들인데(다입자 OSL 연대측정법; multiple grain single aliquot OSL dating), 이 연대측정 모드(mode)에서는 퇴적당시 입자들의 OSL 신호가 서로 다른 정도로 블리칭되었거나(heterogeneous bleaching), 퇴적 이후 생교란(bioturbation) 등의 작용으로 퇴적층 상·하의 입자가 섞여있을 경우, 최종적인 OSL 연대는 각 입자가 지니고 있는 연대의 평균으로서의 의미만 있을 뿐, 대상 퇴적층(host sediments)에 대한 정확한 퇴적연대 동정에 어려움이 있다(예. Demuro *et al.* 2008). 이와 같이 OSL 연대측정을 하고자 하는 퇴적층에서 퇴적 후 교란작용(post-depositional disturbance)이 있었음이 의심되는 경우, 퇴적층을 구성하는 각 개별 석영입자에 대한 OSL 연대측정(single grain OSL dating)을 실시하여 정확한 퇴적연대를 구하는 것이 가능하다(Lian and Roberts, 2006). 따라서, 이번 연구에서는 수렴단층에 의해 절단된 해안단구 퇴적층에 대한 석영단일입자 OSL 연대측정 결과를 보고하고, 기존의 다입자 OSL 연대측정결과와의 차이점과 이들 해안단구의 형성시기에 대해 논의해 보고자 한다.

연구지역, 시료 및 실험방법

연구지역과 시료

수렴단층은 경주시 양남면 수렴리에서 해발고도 약 45 m에 분포하는 제3해안단구층과 그 기반암인 제3기(Tertiary) 화산(쇄설)암을 변위시킨 북동방향의 역단층으로, 노두상에서 약 1.2 m의 변위량을 보인다(그림 2; Lee *et al.*, 1999; Ree *et al.*, 2003); 수렴단층 노두와 읍천단층 사이의 진리 인근에 해발고도 약 35m의 단구가 관찰되어, 일부 학자들은 이를 제3해안단구로, 수렴 및 읍천단층 인근의 단구를 제4단구로 분류하기도 하지만(Kim *et al.*, 2007), 이 연구에

Fig. 2. Suryum Fault site and sample location for OSL dating (Sample code: 12SU-1). Other samples from footwall and fault gouge were those used for previous dating works (ESR and multiple grain OSL datings). These samples are not cited in this work (modified from Choi *et al.*, 2009).

서는 이 둘을 동일한 단구로 분류하여 제3해안단구로 명기하였다. 진리단구에 대해서는 추후 논의에서 다시 다루도록 한다.

수렴단층 노두에서 제3기 화산암을 피복하고 있는 미교결 퇴적층은 대체로 구성 역(gravel)들이 악력으로 쉽게 분쇄될 정도로 풍화가 매우 심하게 진행되어 있다. 이 경우, 자연적으로 혹은 실험실 내에서 OSL 연대측정을 위한 시료 전처리시, 역들로부터 유래된 석영들이 퇴적기원의 석영과 혼합되어 연대측정 결과에 영향을 미칠 수 있다; 역에서 유래된 석영입자들은 퇴적과정에서 OSL 신호가 충분히 민감화(sensitization)되지 않아, OSL 연대측정에 적합하지 못한 물리적 성질을 가지는 경우가 있다(Jeong and Choi, 2012). 수렴단층 노두 상, 하반의 일부에서는 구성역들의 표면에 엘로페인(allophane)이 침전되어 있

어, 상대적으로 풍화가 덜 진행된 층이 관찰된다 (Jeong *et al.*, 2002, 2007). 따라서, 이번 연구에서는 역들로 부터 유래된 석영의 혼입가능성이 상대적으로 낮은, 단층상부의 알로페인층에 길이 30 cm, 직경 5 cm의 스테인레스-스틸 튜브를 삽입하여 시료를 채취하고 연대측정을 실시하였다(그림 2; 시료번호 12SU-1).

실험방법

노두에서 회수된 튜브는 한국기초과학지원연구원의 암실에서 절개한 후 습식체질을 통하여 90-250 μm 크기의 입자를 분리하였다. 그 후, 10% HCl과 10% H_2O_2 를 사용하여 탄산염광물과 유기물을 제거한 후, 중액(Sodium polytungstate; SPT)을 사용하여 석영입자를 분리하였다($2.62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} < \rho < 2.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). 중액분리 과정을 통하여 분리된 입자 중 석영입자의 비율을 높이기 위해서 SPT처리를 두 번 실시하였다. 이 후, 40% HF(45분)를 사용하여 석영입자의 겉표면 약 10 μm 정도를 에칭하고 석영이외의 다른 광물들을 용해시켜 순수한 석영입자를 분리하였다. 단일입자 OSL 연대측정용 디스크(그림 3)의 각 홀(grain hole)이 300 μm 임을 감안하여, 체질을 통해 최종적으로 180-212 μm 크기의 석영입자를 준비하였다.

단일입자 OSL 연대측정을 위해 단일입자 연대측정용 디스크(알루미늄)의 시료 홀(hole)에 100개의 석영입자를 로딩한 후(그림 3), 한국기초과학지원연구원에 설치된 덴마크 리소 DTU(Technical University of

Fig. 3. Quartz grains loaded in a single grain disk for OSL signal measurements.

Denmark, Risø campus)의 루미네선스 자동측정장비(모델: TL/OSL-DA-20C/D)를 사용하여 개별 석영입자로부터의 등가선량(equivalent dose, D_e)을 측정하였다. 이 루미네선스 측정장치는 녹색파장(532 nm)의 빛으로 개별 석영입자를 여기시킬 수 있는 레이저(10 mW Nd:YVO4 solid state diode pumped laser)가 부착되어 있으며, 시료에 가해지는 빔의 크기는 약 20 μm 이다. 각 석영입자로부터 방출되는 OSL 신호는 EMI9235QA 광증폭배관(Photomultiplier Tube; 이하 PMT)을 사용하여 검출되었으며, 7.5 mm Hoya-U340 광학필터를 사용하여 석영입자로부터 방출되는 OSL 신호 중, 약 340 nm의 파장을 가지는 신호만을 연대측정에 사용하였다. 시료의 조사(irradiation)에는 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 베타선원이 사용되었으며, 단일입자 연대측정

Fig. 4. OSL decay curves from individual quartz grains. Following the administration of a laboratory dose of 100 Gy, OSL signals in individual quartz grains were measured at 125°C for 2 s. For D_e estimation, the OSL signals in the initial 0.2 s less background in the last 0.3 s were used. (a) Most quartz grains were bright and showed fast decaying OSL signals, reaching 10% of their initial count rates in less than 0.7 s after the onset of stimulation, (b) while OSL signals in others were dim and slowly decaying.

용 디스크 각각의 홀에 가해지는 선량율은 리소 DTU에서 제작한 표준석영(Calibration quartz Batch 8; $D_e = 5.10 \pm 0.06$ Gy)을 사용하여 측정하였다; 동일한 디스크표면에서도 디스크 중앙에서 멀어질수록 베타 선원으로부터 흡수하는 선량율에 차이가 있을 수 있기 때문에(Ballarini *et al.*, 2006), 단일입자 OSL 연대측정에서는 디스크 각 홀의 선량율을 각각 계산하는 것이 바람직하다.

개별 석영입자의 OSL 신호는 녹색레이저로 125°C에서 2초 동안 여기시켜 측정되었으며, 측정된 신호의 초기 0.2초 동안의 신호에서 마지막 0.3초 동안의 신호를 배경치로 제거한 값을 등가선량 계산에 이용하였다(그림 4a). 개별 석영의 등가선량은 단일시료재현법(Single-Aliquot Regenerative-Dose protocol; SAR protocol, Murray and Wintle, 2000, 2003)을 이용하여 측정되었다. 단일시료재현법에 적용된 열전처리(preheating)는 Choi *et al.*(2009)이 수렴단층 노두 해안단구시료를 이용하여 얻은 다입자 선량재현시험결과(dose recovery test using multiple grain single aliquots)를 근거로, 260°C에서 10초 동안 실시하였다. 선량재현시험에 대한 설명은 Choi, JH *et al.*(2008, 3.5절)에서 상세히 기술하였다. 또한, 전처리 과정동안 제거되지 않은 장식입자로 부터 유래한 루미네선스 신호는 Duller(2003)의 적외선감소법(IR

depletion method)을 사용하여 판별하였으며, 이들은 등가선량 계산에서 제외하였다.

결과 및 토의

단일입자 OSL 감쇄곡선(single grain OSL decay curve)과 성장곡선(dose response growth curves)

수렴단층 노두 해안단구를 구성하고 있는 개별 석영입자들의 OSL 신호는 일반적으로 민감도가 크지 않으며, 측정에 사용된 1200개의 입자들 중 93개의 입자들(약 8%)이 연대측정에 사용할 수 있을 정도의 OSL 신호를 방출하였다. 그림 4a의 석영입자는, 실험실에서 베타선원을 사용하여 약 100 Gy의 방사선을 조사한 후 측정된 초기 OSL 신호가 약 1500 cts(/0.02s)였으며, 여기를 시작한 후 약 0.7초 이후, 초기 신호의 10% 수준에 도달하였다. 반면, 그림 4b의 석영입자는 민감도가 매우 낮아, 100 Gy를 조사한 후의 초기 신호가 100 cts(/0.02s)에 불과하였다.

그림 4a, b의 석영입자를 이용하여 만든 OSL 신호 성장곡선을 그림 5에 나타내었다. OSL 신호의 민감도가 상대적으로 큰 석영입자(그림 4a와 5a)는 291 Gy의 등가선량을 보이며, 특성선량(characteristic dose, D_0)도 약 700 Gy로 매우 큰 포화선량값을 보

Fig. 5. Dose response growth curves of OSL signals emitted from quartz single grains. (a) Bright quartz grains (as shown in Fig. 4a) generally have higher saturation level of ~1400 Gy (i.e. 2×700 Gy), recycling and recuperation being close to unity and less than 10%, respectively (b) In general, dim quartz grains have much lower dose saturation level than that of brighter grains, and also show significant (far more than 10% of natural signal) '0' dose response (recuperation).

인다. 이처럼 단일입자 단위에서 매우 큰 포화선량값을 보이는 석영입자의 존재는 Yoshida *et al.*(2000)에 의해서 이미 보고되어, OSL 연대측정 가능상한의 연장가능성 연구를 위해 사용된 바 있다. 하지만, 비교적 적은 민감도를 보이는 석영입자(그림 4b와 5b)는 연대측정에 사용하기 어려운 몇몇 물리적 특성들을 가지고 있다. 즉, 시료에 방사선조사를 하지 않은 0 Gy 상태에서 방출되는 OSL 신호(이러한 OSL 신호를 ‘recuperated OSL signal’, ‘회귀신호’라 한다)는 전혀 없거나 무시할 만큼 작아야 하지만(즉, 성장곡선이 원점을 지나야 함), 이 석영입자는 방사선조사를 하지 않았음에도 불구하고 자연 OSL 신호에 비해 약 47% 정도의 OSL 신호를 방출하고 있다. 이는 시료 자체의 회귀현상이 본래 크기 때문이거나, OSL 신호의 회귀현상이 실제로는 크지 않지만, 자연 OSL 신호 자체의 민감도가 낮아(그림 4b) 0 Gy에 대한 신호의 기여가 과대평가되었기 때문일 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 배경치 신호의 3σ 보다 큰 자연 OSL 신호를 가지는 입자 중, 회귀현상이 10% 미만인 입자들만을 등가선량 측정과 연대측정에 이용하였다. 뿐만 아니라, 민감도가 작은 석영입자들은 특성선량 값도 100-120 Gy에 불과하여, 200 Gy 이상의 등가선량 측정에는 사용할 수 없었다. 일반적으로 OSL 연대상한은 등가선량이 특성선량의 두 배가 되는 지점에서 결정된다(Wintle and Murray, 2006).

수렴단층 노두 해안단구 퇴적층의 단일입자

OSL 연대

석영입자의 등가선량 분포는 흔히 히스토그램이나 확률밀도함수 등으로 표현되지만, 단일입자 OSL 연대결과는 일반적으로 방사상도(radial plot; Galbraith, 1990)에 도시한다. 방사상도는 서로 다른 정밀도(precision)를 지니는 개별 분석자료를 나타낼 때 유용하게 쓰인다. 이 그래프는 y 축에 $\pm 2\sigma$ 영역을 표시하여, 각 개별입자들의 등가선량 분포가 가우시안분포를 따를 경우, 이론적으로 전체 모수의 95%가 이 영역에 포함되도록 디자인되었다(예. 그림 6a의 회색영역). 또한, x 축에는 측정된 등가선량의 상대오차(relative error)와 정밀도($100/\text{relative error}$ 로 정의됨)를 함께 도시할 수 있어, 등가선량이 정밀하게 측정된 자료일수록 오른쪽에 도시된다. 그리고, 방사상도의 y축 원점(‘0’)에서 데이터를 지나 오른쪽 원호와 만나는 지점에 등가선량을 표시한다.

그림 6a의 방사상도에 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층을 구성하고 있는 개별 석영입자의 등가선량을 도시하면, 이들 석영은 최소 50 Gy에서 610 Gy에 이르는 넓은 등가선량 분포경향을 보임을 알 수 있다. 석영입자들의 등가선량의 분포를 설명할 수 있는 랜덤 혹은 시스템오차(random or systematic error) 외에, 예측할 수 없는 오차로 인한 산포정도를 과분산(overdispersion)이라 한다. 과분산에 대한 자세한 설명은 Lian(2007)과 Galbraith and Roberts(2012)에 상세히 설명되어 있다. 예를 들어, 전체 등가선량 분석자료의 95%이상이 방사상도의 $\pm 2\sigma$ 영역에 포함되어 있을 때, 이들 자료는 하위분산(underdispersed)되어 있다고 하며, $\pm 2\sigma$ 영역에 포함되어 있는 자료의 수가 95% 미만일 경우, 과분산되어 있다고 한다. 모든 입자가 퇴적당시에 완벽하게 혹은 동일하게 불리칭되고, 퇴적 후 교란작용을 겪지 않았을 경우, 즉, 퇴적층을 구성하는 석영입자들이 하나의 연대요소(OSL age component)만 지니고 있을 경우, 개별 석영입자의 등가선량 분포는 약 10%의 과분산을 보이는 것으로 알려져 있다(Jacobs *et al.*, 2006). 그러나, 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층을 구성하고 있는 석영입자의 등가선량 값들은 30±4%의 과분산을 보이고 있어(그림 6a), 이들이 하나의 연대요소로 이루어지지 않았음을 의미한다. 만일, 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층을 구성하는 석영입자들이 하나의 연대요소로 이루어져 있지만, 예측할 수 없는 요인으로 10% 이상의 높은 과분산을 보인다고 가정하여 중심연대모델(Central Age Model, CAM; Galbraith *et al.*, 1999)을 적용하면, 219±10 Gy의 등가선량이 계산되고(그림 6a), 2.65±0.05 Gy/ka의 연간선량(Choi *et al.*, 2009)을 고려하면, 83±4 ka의 중심연대를 구할 수 있다. 이 연대결과는 이미 Choi *et al.*(2009)에서 다입자(multiple grain)를 바탕으로 보고한 OSL 연대범위와 일치하지만, 여전히 인근의 제2해안단구들과 동일한 연대를 보여 충서적으로 설명하기 어렵다. Choi *et al.*(2003a, b, 2009)은 포항-기장에 이르는 제2해안단구 퇴적층에 대한 OSL 연대측정 연구를 통해, 이들 퇴적층에서 분리한 석영입자들을 이용하여 신뢰도 높은 연대결과를 도출할 수 있는 수학적·실험적 방법을 제시하였으며 이로부터 제2해안단구의 형성시기가 MIS 5a 시기임을 제시한 바가 있다. 또한, 50-610 Gy의 등가선량분포를 보이는 수렴단층 노두 해안단구 석영입자들이 하나의 연대요소로만 이루

Fig. 6. The radial plots showing D_e (equivalent dose) distribution of individual quartz grains ($n=93$). D_e values were derived using (a) Central Age Model, (b) Minimum Age Model, and (c) Finite Mixture Model. (d) Single grain data are summed up to simulate multiple grain single aliquot D_e distribution.

어져 있는 것으로 보기에 무리가 있는 것으로 생각되어, 다른 연대모델을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

수렴단층 노두 해안단구 퇴적층이 퇴적될 당시, 모든 입자들의 OSL 신호가 완벽하게 블리칭되지 않았을 경우, 즉, 일부 입자들의 OSL 신호는 퇴적과정 중에 완벽하게 제거되고, 다른 입자들의 OSL 신호는 일부 남아 있는 채로 퇴적되었을 경우, 퇴적층의 퇴적시기는 OSL 신호가 완벽하게 제거된 입자들로부터 알아낼 수 있다. 이 경우, 최소연대모델(Minimum Age Model, MAM; Galbraith, 2005)을 적용하여 퇴적시기를 추정한다. 블리칭이 완벽하게 된 석영입자들의 과분산을 10%로 가정하여, 수렴단층 노두 시료에 최소연대모델을 적용하면, 159^{+9}_{-18} Gy의 등가선량을 구할 수 있으며, 이를 바탕으로 60^{+3}_{-7} ka의 최소연대를 구할 수 있다(그림 6b).

하지만, 이 연대도 제2해안단구와의 층서적 불일치를 설명하지 못하며, 가장 젊은 연대가 퇴적층의 퇴적시기를 지지하지 않음을 의미한다. 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층은 단층운동 당시 심한 진동을 겪었

을 수 있고, 퇴적층이 주로 콩자갈(pea gravel)로 이루어져 있음을 감안하면, 퇴적층을 구성하고 있는 모래크기의 입자들이 상·하로 교란되어 여러 연대요소들을 지닌 석영입자들이 혼재되어 있을 가능성이 높다. 이 경우 혼합연대모델(Finite Mixture Model, FMM; Roberts *et al.*, 2000)을 적용하여 개별 석영입자의 등가선량 분포를 분석할 수 있지만, 혼합연대모델은 최대 세 개의 연대요소들로부터 분리할 수 있다는 단점이 있다. 각 연대요소들의 과분산을 10%로 가정하여 혼합연대모델을 적용하면, 분석된 입자들의 $41\pm 9\%$ 는 160 ± 7 Gy, $54\pm 10\%$ 는 250 ± 12 Gy, 그리고 $6\pm 4\%$ 의 입자들은 514 ± 64 Gy의 등가선량을 가지는 그룹으로 분리할 수 있다(그림 6c). 이는 해안단구 퇴적층을 구성하는 석영입자들이 각각 60 ± 3 ka, 94 ± 5 ka, 그리고 194 ± 24 ka의 연대요소들을 지니고 있음을 보여준다. 이들 연대요소 중, 60 ± 3 ka과 94 ± 5 ka의 연대는 Choi *et al.*(2009)이 수렴단층의 하반에서 채취한 해안단구 퇴적층의 다입자 OSL 연대범위와 일치하며, 194 ± 24 ka의 연대는 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층에 MIS 7 시기의 석영입자가

존재함을 의미한다.

전술한 바와 같이 읍천단층과 수렴단층 사이에 분포하는 진리단구(해발고도 약 35 m; Kim *et al.*, 2007)에서 채취한 해안단구 시료의 다입자 OSL 연대가 116-126 ka임을 감안하면, 가장 뚜렷하게 보일 것으로 예상되는 최후간빙기(MIS 5e, ~125 ka)의 해안단구가 수렴단층 노두 인근지역에서는 왜 확연히 관찰되지 않는가에 대한 의문이 여전히 존재하지만, 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층이 MIS 7 시기에 퇴적되었을 가능성을 배제할 수 없다.

분석에 사용된 개별 석영입자들의 OSL 신호를 모두 더하여, 하나의 다입자 시료(multiple grain single aliquot)로 모사(simulation)하면(한 개의 단일입자 OSL 연대측정용 디스크로 100개의 석영입자를 분석할 수 있고, 1200 개의 석영 단일입자를 분석하였으므로, 12개의 디스크를 사용한 다입자 OSL 연대측정으로 모사되었다), 191 ± 7 Gy의 등가선량이 계산되고, 이는 72 ± 3 ka의 OSL 연대에 해당한다. 중심연대모델과 다입자시료로 모사한 OSL 연대들(각각 83 ka과 72 ka)은 퇴적층을 구성하고 있는 모든 연대요소들의 평균값으로서, 기존에 보고된 다입자 OSL 연대와 일치하며, 이는 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층의 경우, 다입자 OSL 연대측정법으로는 정확한 퇴적시기를 추정할 수 없음을 의미한다.

결론

경주시 양남면에 분포하는 해발고도 약 45 m의 수렴단층 노두 해안단구는 단층활동 시기에 대한 이해와 관련하여 그 동안 많은 주목을 받아왔으나, 정확한 형성시기를 지시할 수 있는 신뢰할 만한 연대결과는 보고되지 않았다. 석영 다입자를 이용한 기존의 OSL 연대결과도 대부분 수렴단층 노두보다 하위 단구인 제2해안단구의 연대와 비슷하거나, 혹은 이보다 젊은 연대가 보고되어, 연대자료의 층서적 해석에 어려움이 있었다. 그러나, 이번 단일입자 OSL 연대측정을 통하여 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층을 구성하고 있는 석영입자들이 서로 다른 연대요소들을 지니고 있으며, 분석된 입자의 6±4%가 MIS 7의 퇴적 연대를 지시하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 단층에 의해 절단된 해안단구 퇴적층이 퇴적과정동안, 혹은 그 이후의 교란작용으로 인해, 연대를 달리하는 상당량의 석영입자들이 서로 혼합되었을 가능성을 지

시한다. 수렴단층 노두 인근에 최후간빙기(MIS 5e) 단구의 발달이 미약하거나, 전혀 관찰되지 않는 이유에 대한 의문이 여전히 존재하지만, 이 연구에서 제시한 단일입자 OSL 연대결과는 수렴단층 노두 해안단구 퇴적층이 MIS 7 시기에 퇴적되었을 가능성을 배제할 수 없음을 의미한다.

사사

원고를 꼼꼼하게 읽고 건설적인 의견을 제시해 주신 익명의 심사위원들께 감사를 드린다. 이 연구는 한국기초과학지원연구원의 ‘방사성물질 분석연구(과제번호 C34701)’와 2014년도 강원대학교 ‘학술연구 조성비(과제번호 120140288)’의 도움으로 수행되었다.

References

- Ballarini, M., Wintle, A.G. and Wallinga, J., 2006, Spatial variation of dose rate from beta sources as measured using single grains. *Ancient TL*, 24, 1-7.
- Chappell, J. and Shackleton, N.J., 1986, Oxygen isotopes and sea level. *Nature*, 324, 137-140.
- Cheong, C.S., 2002, Dating marine terraces. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 279-291.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.S. and Chang, H.W., 2003a, Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 407-421.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Cheong, C.S., Hong, D.G. and Chang, H.W., 2003b, The resolution of stratigraphic inconsistency in luminescence ages of marine terrace sediments from Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1201-1206.
- Choi, J.H., Kim, J.W., Murray, A.S., Hong, D.G., Chang, H.W. and Cheong, C.S., 2009, OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics. *Quaternary International*, 199, 3-14.
- Choi, J.H., Lim, H.S., Youn, 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 glacier retreat. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 523-539.
- Choi, S.J., Merritts, D.J. and Ota, Yoko, 2008, Elevations and ages of marine terraces and late Quaternary rock uplift in southeastern Korea. *Journal of Geophysical Research*, 113, B10403.
- Demuro, M., Roberts, R.G., Froese, D.G., Arnold, L.J.,

- Brock, F. and Bronk Ramsey, C., 2008, Optically stimulated luminescence dating of single and multiple grains of quartz from perennially frozen loess in western Yukon Territory, Canada: Comparison with radiocarbon chronologies for the late Pleistocene Dawson tephra. *Quaternary Geochronology*, 3, 346-364.
- Duller, G.A.T., 2003, Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements. *Radiation Measurements*, 37, 161-165.
- Galbraith, R.F., 1990, The radial plot: graphical assessment of spread in ages. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 17, 207-214.
- Galbraith, R.F. and Roberts, R.G., 2012, Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. *Quaternary Geochronology*, 11, 1-27.
- Galbraith, R.F., 2005, *Statistics for fission track analysis*. Chapman and Hall/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., Olley, J.M., 1999, Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter. Northern Australia: part 1, experimental design and statistical models. *Archaeometry*, 41, 339-364.
- Jacobs, Z., Duller, G.A.T. and Wintle, A.G., 2006, Interpretation of single grain D_e distributions and calculations of D_e . *Radiation Measurements*, 41, 264-277.
- Jeong, G.Y., Bae, J.H. and Cheong, C.S., 2002, Origin of allophane and retardation of pebble weathering in Quaternary marine terrace deposits. *Clay and Clay Minerals*, 50, 145-156.
- Jeong, G.Y., Cheong, C.S. and Choi, J.H., 2007, The effect of weathering on optically stimulated luminescence dating. *Quaternary Geochronology*, 2, 117-122.
- Jeong, G.Y. and Choi, J.H., 2012, Variations in quartz OSL components with lithology, weathering and transportation. *Quaternary Geochronology*, 10, 320-326.
- Kim, J.W., Chang, H.W., Choi, J.H., Choi, K.H. and Byun, J.M., 2007, Landform characteristics of coastal terraces and optically stimulated luminescence dating on the terrace deposits in Yangnam and Yangbuk area of the Gyeongju city, South Korea. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 14, 1-14.
- Kim, J.Y., Lee, D.Y. and Choi, S.G., 1998, A research on Pleistocene stratigraphy. *Korean Journal of Quaternary Research*, 4, 41-57.
- Kim, S.W., 1973, A study on the terraces along the South-eastern coast(Bang-eogin~Pohang) of the Korean peninsula. *Journal of Geological Society of Korea*, 9, 89-121.
- Lee, B.J., Ryoo, C.-R. and Chwae, U., 1999, Quaternary faults in the Yangnam area, Kyongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 1-14.
- Lee, D.Y., 1985, Quaternary deposits in the coastal fringe of the Korean peninsula. Dissertation to the Vrije Universiteit, Brussel, p.315.
- Lee, D.Y., 1987, Stratigraphical research of the Quaternary deposits in the Korean peninsula. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 1, 3-20.
- Lian, O.B. and Roberts, R.G., 2006, Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2449-2468.
- Lian, O.B., 2007, Optically Stimulated Luminescence. In *Encyclopedia of Quaternary science Volume II* (ed. Elias, S.A.) Elsevier Science, 1491-1505.
- 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.
- Ree, J.-H., Lee, Y.-J., Rhodes, E.J., Park, Y., Kwon, S.-T., Chwae, U., Jeon, J.-S., Lee, B.-J., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean peninsula: age constraint by optically stimulated luminescence dating. *The Island Arc*, 12, 1-12.
- Roberts, R.G., Galbraith, R.F., Yoshida, H., Laslett, G.M. and Olley, J.M., 2000, Distinguishing dose populations in sediment mixtures: a test of single-grain optical dating procedures using mixtures of laboratory-dosed quartz. *Radiation Measurements*, 32, 459-465.
- 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.
- Yoshida, H., Roberts, R.G., Olley, J.M., Laslett, G.M. and Galbraith, R.F., 2000, Extending the age range of optical dating using single 'supergrains' of quartz. *Radiation Measurements*, 32, 439-446.

2014년 7월 4일 접수

2014년 7월 4일 심사개시

2014년 7월 21일 채택