

남극 킹조지섬에 분포하는 원형구조토(Sorted Circles)에 대한 OSL 연대측정 적용가능성 연구

최정현^{1,*} · 임현수² · 윤호일² · 정창식¹ · 임창복³ · 김종욱⁴ · 장호완⁵

¹한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

²한국해양연구원부설 극지연구소 극지기후센터

³한국원자력안전기술원 안전기술부

⁴서울대학교 지리교육과

⁵서울대학교 지구환경과학부

요 약

빙하퇴적물의 퇴적연대는 빙하후퇴시기 및 극지기후변화 양상을 이해하는 데에 중요한 정보를 제공한다. 하지만, 연대측정 대상 퇴적물로부터 방사성동위원소 연대측정이 가능한 적절한 시료의 채취가 항상 가능한 것은 아니기 때문에, 많은 경우 빙하퇴적물에 대한 직접적인 퇴적연대측정은 한계를 지니고 있다. 더욱이 퇴적물내의 석영을 사용하기 때문에 대상 시료의 제한이 거의 없는 OSL(Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법에 있어서도 빙하퇴적물에 포함된 석영입자의 OSL 신호가 퇴적과정 중에 완벽하게 제거되지 않아 OSL 연대측정결과가 실제 퇴적연대보다 오래된 연대를 지시하는 경우가 많다. 극지방의 평탄한 곳에서는 퇴적물 공극내의 수분이 결빙-해동과정을 반복하면서 영구동토층 상부 활동층의 입자가 수직, 수평적으로 순환을 하는 경우가 있으며, 그 결과로 크기가 큰 자갈 혹은 거력들이 내부의 세립질 입자들을 둘러싸는 원형구조토(sorted circle)라는 특징적인 지형으로 나타나기도 한다. 따라서, 원형구조토의 형성과정 동안 빙하퇴적물입자들이 순환을 하며 햇빛에 노출이 되어 기존의 OSL 신호가 제거될 기회가 크기 때문에, 다른 빙하퇴적물에 비해 상대적으로 OSL 연대측정에 적합할 것으로 판단되었다. 이 가정을 확인하기 위하여, 킹조지섬(King George Island) 세종기지 인근에 분포하는 두 개의 원형구조토(해발고도 41 m 와 66 m)에서 시료를 채취한 후, 석영입자를 분리하여 OSL 연대측정 가능성을 검토하였다. 채취한 시료의 석영입자들은 일반적인 단일시료재현법(SAR법)을 적용하여 신뢰도 높은 등가선량(equivalent dose)을 측정하기에 부적합한 OSL 특성을 보인다. 예를 들어, 채취된 석영입자의 OSL 신호에는 OSL 연대측정에 사용되는 fast OSL component가 존재하지 않는다. 또한, LM-OSL과 CW-OSL 신호를 사용한 dose recovery test에서 실험실 조사량이 약 10 % 정도 과소평가되었다. 단일시료재현법으로 측정된 등가선량의 가중평균은 18 ± 1 Gy였고, 이를 바탕으로 한 OSL 연대결과는 11 ± 1 ka 로서, 이는 킹조지섬 세종기지 인근의 빙하후퇴가 적어도 11 ± 1 ka 이전에 일어났을 가능성을 의미한다.

주요어: 원형구조토, OSL 연대측정, 빙하후퇴, 등가선량, 가중평균, medium OSL component

Jeong-Heon Choi, Hyoun Soo Lim, Ho Il Yoon, Chang-Sik Cheong, Chang-Bock Im, Jong-Wook Kim and Ho-Wan Chang, 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. v. 44, no. 4, p. 523-539

ABSTRACT: During the deglaciation period, the glaciers dump till sediments as they melt away, thus the depositional ages of these sediments provide important information on the timing of glacial retreat(the initiation and the duration of the local deglaciation). However, in many cases, direct dating of till sediments is not readily possible because of a lack of suitable material for conventional dating methods, except where ^{14}C dating is applicable. In addition, optical dating on these sediments has not been always successful because most glacial deposits usually have little chances of being exposed to sufficient sunlight, which results in significant overestimation in optical ages. The till sediments, however, sometimes form a diagnostic geomorphic structure, referred to as *sorted circle*,

* Corresponding author: +82-42-865-3553, E-mail: jhchoi@kbsi.re.kr

through repeated freeze-thaw cycles on flat areas in polar regions. In the course of its formation, the soil particles in the active layer may move up and down actively, and therefore some of these particles are presumed to have chances to be exposed to sufficient sunlight for the latent OSL signals to be completely bleached, which is one of the most important prerequisite process for reliable optical dating. To test this hypothesis, we collected sediment samples from two sorted circles at the elevation of 41 m and 66 m in King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. Quartz grains extracted from these sediments have various undesirable OSL properties for routine SAR-based optical dating. For instance, the OSL signals of those quartz grains do not have fast OSL component that is the usual signal for optical dating. In dose recovery test using both LM-OSL SAR and conventional SAR procedure, the recovered doses were lower than the given dose by about 10 % or less. The OSL age obtained on the basis of weighted mean D_e value of 18 ± 1 Gy was 11 ± 1 ka, which implies that the deglaciation near King Sejong station may have occurred before 11 ± 1 ka.

Key words: sorted circle, OSL dating, deglaciation, equivalent dose, weighted mean, medium OSL component

(Jeong-Heon Choi and Chang-Sik Cheong, Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, South Korea; Hyoun Soo Lim and Ho Il Yoon, Center of Climate Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, South Korea; Chang-Bock Im, Safety Technology Division, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon 305-338, South Korea; Jong-Wook Kim, Department of Geography Education, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea; Ho-Wan Chang, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea)

1. 서 언

최근 지구온난화에 대한 관심이 증대됨에 따라 극 지역의 기후변화에 대한 논의도 활발하게 진행되고 있다(Pages news(2007), vol. 15, No. 2, "Past Climate Dynamics: A Southern Perspective). 극지역의 기후변화 양상을 파악하고 예측하기 위해서는 과거(특히, 제4기) 극지역의 고기후변화에 대한 정보획득과 이들의 올바른 이해에 관한 연구가 필수적으로 선행되어야 한다. 과거 전지구적인 기후변화는 극지역 빙하의 후퇴(deglacliation)와 전진(glaciation)의 원인이 된다. 특히, 빙하의 후퇴는 극지역에 많은 빙하퇴적물을 남기게 되고, 이들에 대한 연대자료는 전지구적인 기온상승에 따른 빙하후퇴의 시기를 지지하여 극지역 고기후학 연구에 중요한 자료로 사용된다.

세종기지가 위치한 남극 남셰틀랜드 군도(South Shetland Islands) 킹조지섬 인근에서도 많은 연구자들이 이 지역의 빙하후퇴시기를 밝혀내기 위한 다양한 연구를 수행하여 왔다. 하지만, 각 연구자들이 추정한 빙하후퇴시기는 약 5 ka에서 17 ka까지로 여전히 논의가 계속되고 있다. 예를 들어, Jeong(2006)은 원형구조토(sorted circle) 내에 보존된 이끼와 지의류를 이용하여 290-4710 yrs BP의 방사성탄소연대를 보고하였고, 이들이 이 지역 빙하후퇴시기의 하한일 가능성을 제기하였다. 또한, Hjort *et al.* (1998)은 북남극반도 인근의 다양한 방사성탄소연

대를 바탕으로 이 일대의 빙하후퇴가 9000-5000 yrs BP의 시기에 일어났다고 주장하였다. Björck *et al.* (1998)과 Yoon *et al.*(2000)도 방사성탄소연대를 근거로 약 5000 yrs BP의 빙하후퇴시기를 제안한 바가 있다. 반면에, John(1972)과 Sugden and Clapperton (1986)은 육성퇴적물에 대한 연구를 통해 이 지역의 빙하후퇴가 약 10,000 yrs BP에 시작되었을 것으로 보았으며, Yoon *et al.*(1997)은 맥스웰만(Maxwell Bay) 퇴적물의 퇴적율(sedimentation rate)을 근거로 맥스웰만의 빙하후퇴는 약 17000 yrs BP에 시작된 것으로 보고하였다.

빙하후퇴시기를 추정하기 위한 이러한 노력들은 많은 경우 퇴적물 내에서 채취한 시료의 방사성탄소연대를 근거로 이루어져 왔다. 하지만, 방사성탄소연대는 대상시료의 퇴적연대를 지시한다기 보다는 대상시료가 대기와 탄소동위원소의 교환작용을 중지한 이후 경과된 시간을 의미하기 때문에, 빙하후퇴이후 상당기간 동안 생물이 생존하기에 적합하지 않은 환경이었을 경우, 실제 빙하후퇴시기보다는 매우 젊은 연대를 나타낼 것이다. 해양시료에 대한 탄소연대측정의 경우에는 저장고효과(reservoir effect)에 의해 실제 연대보다 오래된 연대를 지시할 가능성이 높다(Dumond and Griffin, 2002). 따라서, 빙하후퇴시기의 정확한 추정은 빙하퇴적물의 퇴적시기를 직접적으로 연대측정할 수 있는 방법에 의해 보다 효과적으로 이루어질 것으로 생각된다. 이

러한 목적에 가장 부합되는 것으로 여겨지는 것이 최근 제4기 퇴적물의 연대측정에 널리 이용되고 있는 OSL(Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법이다(Murray and Olley, 2002). OSL 연대측정법을 사용하여 퇴적물의 정확한 퇴적연대를 얻어내기 위한 가장 핵심적인 전제조건 중의 하나는 퇴적물 내의 대상시료(주로 석영 혹은 장석입자)가 퇴적될 당시 충분한 시간동안 햇빛에 노출되어 석영(혹은 장석입자)이 기존에 가지고 있던 OSL 신호를 모두 잃어버려야 한다는 것이다(완벽한 블리칭; complete bleaching). Rhodes and Pownall(1994)은 빙하하성환경(glaciofluvial environment)에서는 석영입자들이 완벽하게 블리칭되지 않아 OSL 연대가 실제 퇴적시기보다 오래된 연대를 지시할 수 있다고 하였다. 하지만, 이들은 이후의 연구를 통하여 Rhodes and Pownall(1994)이 보고한 실제보다 오래된 OSL 연대는 불완전한 블리칭 때문이 아니라, 석영 OSL 신호의 열적전이현상(thermal transfer)에서 기인한 것으로 해석하였다(Rhodes, 2000). Bøe *et al.*(2007)도 노르웨이 남부 빙하퇴적물의 OSL 연대측정 연구를 통하여 빙하에 의해 덩핑(dumping)된 빙하퇴적물의 경우에도 퇴적과정동안 석영입자의 블리칭이 거의 완벽하게 이루어진다고 보고하였다. 하지만, OSL 연대측정에 매우 유리한 것으로 알려진 여러 퇴적환경(예를 들어, 풍성층, 해빈층 등)과는 달리 빙하환경에서 형성되는 퇴적물의 경우, 석영 OSL 신호의 불완전한 블리칭(incomplete bleaching) 가능성은 여전히 클 것으로 생각된다(예: Alexanderson and Murray, 2007).

서남극 킹조지섬 세종기지 인근에는 다양한 크기의 원형구조토가 분포하는데, 원형구조토는 빙하후 퇴시에 노출된 퇴적물들이 반복적인 결빙과 해동과정에 의해 수평, 수직적으로 이동하면서 자연적인 분급작용에 의해 형성된다. 따라서, 원형구조토내의 입자들은 그 형성과정동안 햇빛에 장시간 노출될 가능성이 일반적인 빙하퇴적물보다 높아 OSL 연대측정의 초기조건(complete bleaching)을 잘 만족시킬 것으로 예상된다. 이번 연구에서는 킹조지섬 세종기지 인근에 분포하는 원형구조토내의 석영입자들을 이용하여 OSL 연대측정을 실시하고, OSL 연대를 빙하후퇴시기 추정에 적용 가능한지의 여부를 살펴 보았다.

2. 원형구조토(sorted circles)의 형성과 OSL 연대측정 가능성

구조토(patterned ground)는 수분을 함유한 퇴적물의 결빙과 해동(freezing and thawing)이 반복되는 주빙하환경(periglacial environment)에서 주로 관찰된다. 구조토는 분포지역의 지형특성(특히 사면의 경사도)과 형성기작의 차이에 따라 원형(circles), 다각형(polygons), 줄무늬(stripe) 모양 등 여러 가지 다양한 표면구조를 보인다. 이 중 원형구조토(sorted circles)는 주빙하환경의 편평한($<4^\circ$) 지형에서 다양한 크기의 역(boulder-pebble)들이 세립질의 퇴적물을 둘러싼 형태로 나타난다. 형성된 원형구조토의 크기는 원형의 둘레를 구성하는 역의 크기가 클수록 커지는 경향을 보이기도 한다(Goldthwait, 1976). 원형구조토의 형성기작에 대해서는 아직도 학자들에 따라 여러 가지 이견들이 있지만 크게 다음의 세 가지로 나누어 볼 수 있다; 1) 공극수의 결빙에 따른 토양의 차별용기(differential frost heave; Matsuoka *et al.*, 2003), 2) 해동시기에 일어나는 토양의 밀도차이(buoyancy-driven soil circulation; Hallet and Prestrud, 1986), 3) 해동시기에 일어나는 공극수의 밀도차이(free convection of soil porewater; Krantz, 1990). 그러나, 이 세 가지 모델은 공통적으로 빙하퇴적물의 결빙과 해동이 반복됨에 따라 영구동토층 상부의 활동층(active layer)내 토양입자들의 움직임이 순환셀(convection cell)을 형성하고, 이에 따라 상대적으로 큰 거력들은 바깥쪽으로 이동하고, 세립질 입자들은 안쪽으로 모이게 되는 원형구조토의 형성기작을 설명하고 있다. 실제로, Kessler *et al.*(2001)은 컴퓨터 모델링을 통하여 빙하퇴적물의 반복적인 결빙과 해동으로 인한 토양입자들의 순환셀이동이 원형구조토 형성의 주요기작임을 제시하였다(그림 1).

전술한 바와 같이("1. 서언" 참조) 빙하퇴적물에 대한 OSL 연대측정에 있어서 가장 핵심적인 전제조건 중 하나는 빙하퇴적물이 퇴적될 때, 퇴적물 내 석영입자들의 기존 OSL 신호가 완전히 "0"이 되었는데(complete bleaching)에 있다. Kessler *et al.*(2001)의 모델을 따르면, 원형구조토는 형성과정중에 입자 순환셀이 수천 번 이상 순환하게 된다(그림 1(b) 참조). 따라서, 빙하의 후퇴와 함께 덩핑

(dumping)된 일반적인 빙하퇴적물과는 달리 입자들이 햇빛에 충분히 노출되어 OSL 연대측정의 초기 조건(complete bleaching)을 만족시킬 가능성이 높을 것으로 예상된다. 또한, 원형구조토가 형성되는 기간에 대해서는 분포지역의 환경에 따라 다양한 의견이 제시되고 있지만, 원형구조토의 형성은 빙하퇴적물이 쌓인 후 수십 년에서 수백 년내에 이루어지는 것으로 보고되고 있다(Ballantyne and Matthews, 1983; Matthews *et al.*, 1998; Kessler *et al.* 2001; Kessler and Werner, 2003; Haugland, 2004). 따라서, 원형구조토에 대한 OSL 연대측정 결과는 빙하후퇴시기와 큰 차이가 없을 것으로 생각되지만,

엄밀한 의미에서는 빙하후퇴의 하한연대를 지시하게 된다.

3. 원형구조토의 OSL 연대측정 가능성 검토

3.1 시료채취 및 시료전처리

세종기지가 위치한 킹조지섬 바톤반도의 관악봉, 삼봉, 사봉일대에는 직경 ~1 m에서 ~3 m에 이르는 다양한 크기의 원형구조토가 분포한다(그림 2). 원형구조토의 바깥 부분을 구성하는 역들은 주변 기반암 지질을 반영하여 응회암, 현무암질 안산암 등의 화산암과 화강섬록암으로 구성되어 있다. 또한, 원형

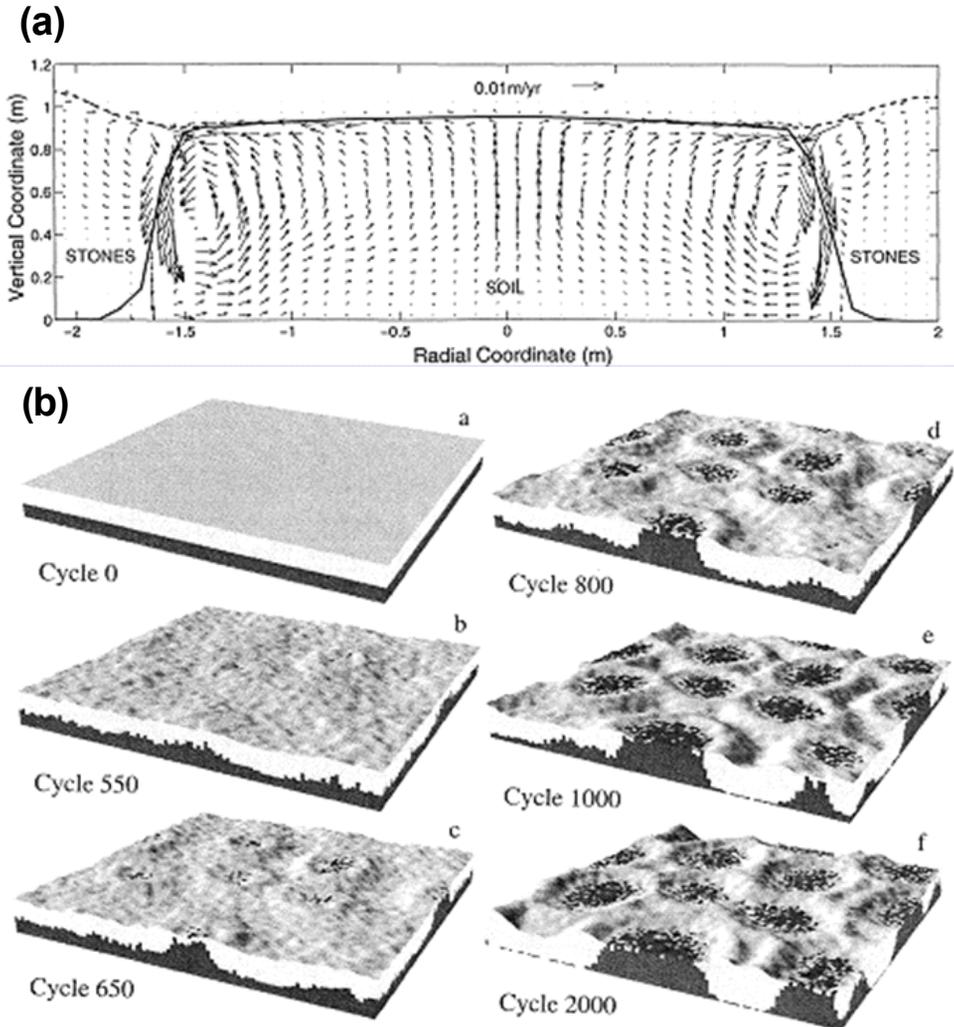


Fig. 1. Computer simulation for the formation of sorted circles (from Kessler *et al.*, 2001)

구조토 주변에는 지의류와 이끼류들이 잘 발달하고 있어 원형구조토가 안정된 상태에 있는 것으로 생각된다(Martini *et al.*, 2001).

시료는 관악봉에서 세종기지사이의 구조토에서 총 9개를 채취하였지만(그림 2(c)), 본 연구에서는 세종기지 동쪽 약 500 m 떨어진 관악봉 말단에 분포하는 원형구조토에서 채취한 두 개의 시료를 선택하여 실험에 사용하였다. 시료는 길이 30 cm, 직경 4.5 cm의 스테인레스-스틸 파이프를 원형구조토 표면에 수직으로 삽입하여 채취하였다. 시료번호 SC-6이 채취된 원형구조토는 해발고도 약 66 m에 위치하고 있으며 장축방향의 길이는 90 cm, 단축방향은 60 cm인 타원형이다(그림 2(d)). 시료번호 SC-9가 채취된 원형구조토는 해발고도 약 41 m에 위치하고 있으며 장축방향의 길이는 110 cm, 단축방향은 80 cm였다(그림 2(e)). 두 원형구조토 모두 타원의 안쪽으로는 세립질 입자들이 분포하며 가장자리는 지름이 10 cm 이상의 cobble 내지 boulder로 되어 있어 전형적인 원형구조토의 모습을 보인다.

채취된 시료파이프는 한국기초과학지원연구원에 설치된 암실에서 절단되어, 시료채취시 햇빛노출이 없었던 가운데 부분의 퇴적물과 시료채취시 햇빛에 노출되었던 파이프 양끝의 퇴적물 시료로 분리한 후 각각 등가선량(D_e , equivalent dose) 측정용 시료와 연간선량(dose rate)용 시료로 사용하였다. 등가선량 측정을 위해 원형구조토 시료는 암실에서 습식체질(wet sieving)로 90-250 μm 크기의 입자들을 선별하고, 비중 2.7의 중액(Sodium Polytungstate)을 사용하여 중광물을 분리하였다. 중광물을 분리하고 남은 시료는 10% HCl, 10% H_2O_2 로 처리하여 탄산염광물과 유기물을 제거한 후, 40% HF로 한 시간, 35% H_2SiF_6 로 7일간 처리하여 석영입자만을 추출하였다(최정현 외, 2004).

3.2 적외선검사(IR test)

퇴적물을 이루고 있는 구성입자들 중 장석입자(특히 K장석)도 외부에서 일정한 에너지가 가해지면 루미네선스 신호를 방출한다. 하지만, 장석입자는 상온에서 루미네선스 신호의 비정상적인 감소현상(anomalous fading; Wintle, 1973; Wallinga *et al.*, 2001)으로 인해 퇴적연대의 과소평가 문제가 있으며, 격자내부에 방사성원소인 K를 포함하고 있어 내

부연간선량(internal dose rate)계산이 간단하지 않다. 따라서, 석영입자를 이용한 OSL 연대측정시에는 시료전처리를 통하여 분리된 석영입자들 중에 장석오염이 없음을 확인하는 것이 중요하다. 석영입자와는 달리 장석입자는 적외선에 의해 여기되어 루미네선스 신호를 발생시키기 때문에(이를 석영의 OSL 신호와 구별하여 IRSL이라 한다), 시료전처리를 거친 시료들의 IRSL 신호 방출여부를 관찰하면 장석입자에 의한 오염여부를 판단할 수 있다. 이와 같이 시료의 IRSL 신호를 관찰하여 장석오염의 여부를 검사하는 과정을 "적외선검사(이하, IR test)"라 한다. 본 연구에서는 전처리과정을 거친 시료 SC-6과 SC-9을 이용하여 직경 약 8 mm 크기의 aliquot(125 μm 크기의 석영입자 약 4000개)을 각각 다섯 개씩 준비하여 IR test를 실시하였다(표 1). 먼저, 준비된 aliquot들을 260°C에서 10초 동안 열전처리 하고, 125°C에서 40초 동안 적외선광원으로 여기시켜 IRSL 신호를 측정하였다(LNR). 이후, IRSL신호 측정에 사용된 동일한 aliquot들을 다시 125°C에서 40초 동안 청색광원으로 여기시켜 발생한 OSL 신호를 측정하였다(LNB)(Step 1-3); 이 측정과정동안 각각의 aliquot들이 가지고 있던 루미네선스 신호(IRSL과 OSL)는 "0"이 된다. 이 aliquot들에 약 40 Gy의

Table 1. Procedure for IR test in this study

| Step | Treatment ^a | Observed ^b |
|------|--|-----------------------|
| 1 | Preheat (for 10s at 260°C) | - |
| 2 | IR LED stimulation (for 100s at 125°C) L_{NR} (IRSL) | |
| 3 | Blue LED stimulation (for 40s at 125°C) L_{NB} (OSL) | |
| 4 | Irradiation (40 Gy) | - |
| 5 | Preheat (for 10s at 260°C) | - |
| 6 | IR LED stimulation (for 100s at 125°C) L_{RR} (IRSL) | |
| 7 | Blue LED stimulation (for 40s at 125°C) L_{RB} (OSL) | |

^a In steps 1-3, a naturally irradiated aliquot, which is usually called "natural aliquot", is stimulated with IR and Blue LED. During steps 2 and 3, the luminescence signals are bleached to a background level. In step 4, regeneration dose of about 40 Gy is administered to the bleached aliquot, and the irradiated aliquot is then called "beta irradiated aliquot" in the text.

^b L_{NR} and L_{NB} refer to the IRSL and OSL signals from "natural aliquot". L_{RR} and L_{RB} denote the IRSL and OSL signals from "beta irradiated aliquot". The IRSL signals observed in steps 2 and 6 (L_{NR} and L_{RR}) are derived from the initial 2 s of IRSL signal less a background estimated from the last 10 s of the signal, whereas OSL signals in steps 4 and 7 (L_{NB} and L_{RB}) are derived from the initial 0.8 s of OSL signal less the last 4 s of OSL signal as a background.

방사선을 조사한 후(Step 4), 전술한 것과 동일한 과정을 거쳐 LRR와 LRB를 측정하였다(Step 5-7). 표 1에서 실험과정 step 1-3 상태에 있는 aliquot들은 실험실 조사(laboratory irradiation)를 받지 않았으

므로 “자연시료(natural aliquot)”라 하며, 이와는 대조적으로 실험과정 step 4-7 상태에 있는 aliquot들은 실험실에서 임의의 방사선량을 조사받은 상태이므로 “실험실조사시료(beta irradiated aliquot)”

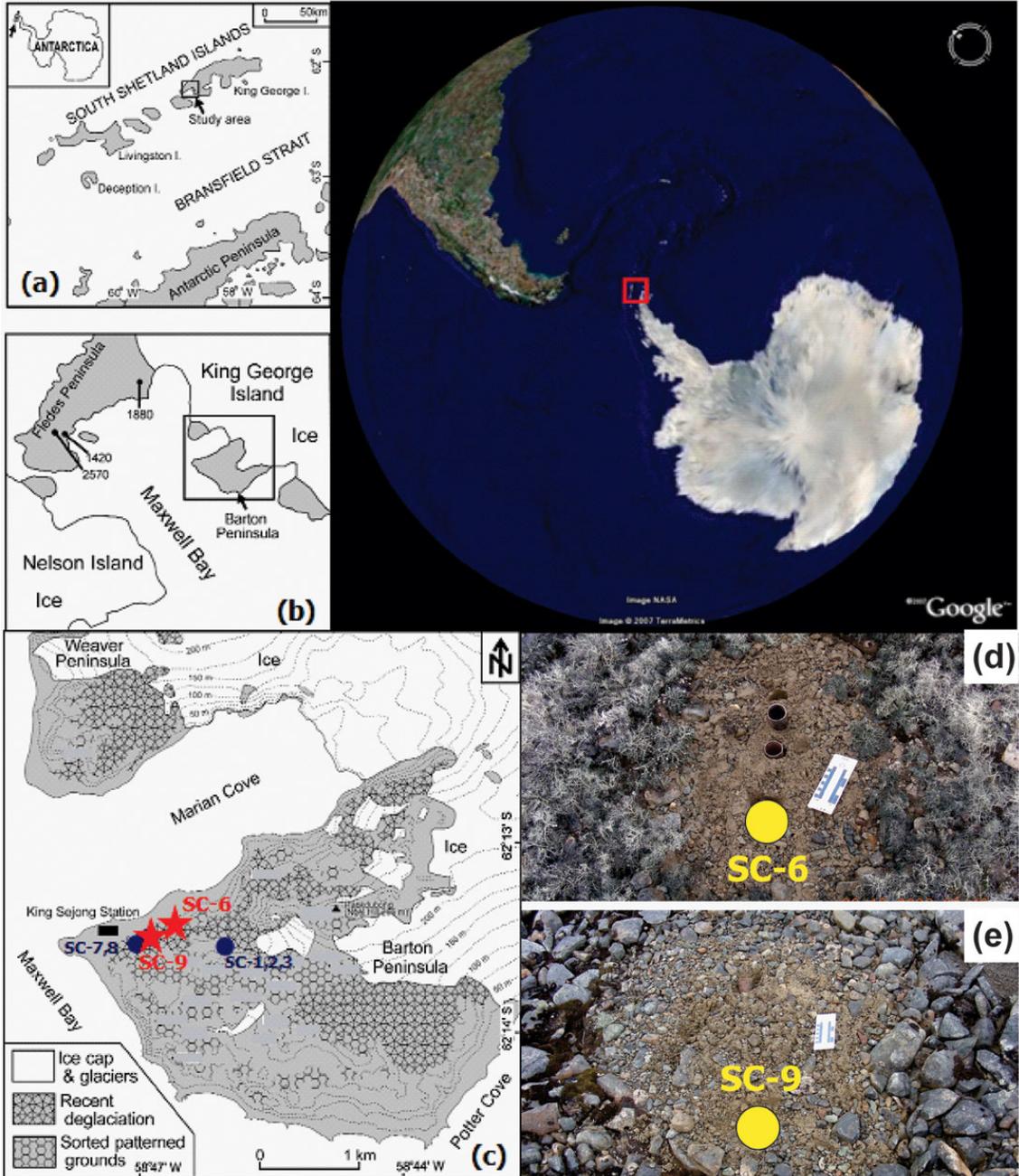


Fig. 2. (a-c) Sample location map (adopted from Jeong(2006)). (d-e) Sorted circles from which the samples for optical dating were collected((d)SC-6, (e)SC-9).

라 한다. 일반적으로 IR test를 통하여 측정된 자연 시료와 실험실조사시료의 IRSL신호/OSL 신호비가 10% 미만일 경우, 장식입자의 오염이 OSL 연대측정 결과에 미치는 영향은 미미한 것으로 알려져 있다(e.g. Choi *et al.*, 2006a). 시료 SC-6과 SC-9에 대한 IR test 결과, 자연시료에 대한 LNR/LNB비는 각각 5±1%와 6±2% 였고, 실험실조사시료에 대한 LRR/LRB비는 각각 5±1%와 7±1%로서 두 시료 모두 전처리과정을 통하여 장식입자가 효과적으로 제거되어 OSL 신호특성관찰이나 연대측정결과가 장식입자 오염에 의해 영향을 받을 가능성은 거의 없을 것으로 판단되었다.

3.3 실험방법

3.3.1 석영의 OSL신호 검출 및 등가선량 측정

석영입자의 OSL 신호는 한국기초과학지원연구원에 설치된 루미네선스 자동측정장비(Model: Risø TL/OSL-DA-15A/B)를 사용하여 측정하였다(Bøtter-Jensen and Murray, 1999). 석영의 OSL 신호는 시료를 최대 약 30 mW/cm²의 세기로 여기(stimulation)시킬 수 있는 청색광원(Blue-LED, 470±30 nm)을 사용하여 발생시켰고, 발생된 OSL 신호는 EMI 9236QA PMT(Photomultiplier tube)와 7 mm Hoya U-340 검출필터를 사용하여 검출하였다. 시료의 조사(irradiation)에는 루미네선스 자동측정장비에 부착된 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 베타선원(조사율: 0.078±0.002 Gy/s 혹은 0.227±0.004 Gy/s)이 사용되었다.

석영의 OSL 신호는 OSL신호를 발생시키는 방식에 따라 크게 CW-OSL(continuous wave OSL)과 LM-OSL(Linearly modulated OSL; Bulur, 1996)의 두 가지로 나눌 수 있는데(3.4절 참조), CW-OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정하게(이 연구에서는 30mW/cm²) 유지한 채로 측정하며, 이 때 OSL 신호는 시간에 따라 지수함수적으로 감쇠하는 곡선 형태로 나타난다. 이와는 달리, LM-OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정시간동안 선형적으로 증가시켜 가며 관찰되는 OSL 신호로서 빛에 민감한 OSL component 순서에 따른 일련의 피크(peak)로 나타난다. 이번 실험에서는 여기광원의 세기를 0에서 30 mW/cm²까지 선형적으로 증가시키며 LM-OSL 신호를 측정하였다. CW-OSL과 LM-OSL 신호에 대한 자세한 설명은 3.4 절에 제시하였다.

석영의 등가선량(D_e, equivalent dose; 단위: Gy)은 기본적으로 Murray and Wintle(2000, 2003)의 단일시료재현법(SAR법; Single-Aliquot Regenerative-Dose법)을 이용하여 구하였다(표 2). 단일시료재현법에 대한 보다 상세한 설명은 이미 최정현 외(2004, 2.2.2 절)에 보고되었다.

3.3.2 연간선량 측정

원형구조토를 구성하고 있는 광물 중 일부는 K, U, Th, Rb 등의 방사성원소들을 포함하고 있으며, 원형구조토가 형성된 이후 시간이 지남에 따라 이들 원소는 방사성붕괴를 하여 α입자, β입자, γ선을 방출한다. 원형구조토내의 석영입자들은 방사성원소의 붕괴로 인한 이들 방사선과 우주선(cosmic ray)에 노출되어, 이들 에너지를 격자 내에 축적하게 된다. 이 축적된 에너지는 석영입자가 자연상태에서 햇빛에 노출되거나 혹은 실험실에서 일정 파장의(즉, 일정한 에너지의) 빛에 노출되면 OSL 신호의 형태로 방출되고, 이 OSL 신호의 양은 석영입자가 퇴적되어 햇빛으로부터 차단된 이후 경과한 시간, 즉, 흡수한 방사선량에 비례한다. 이 흡수선량과 OSL신호의 비례관계는 석영의 등가선량 측정에 매우 중요하지만, 개별 석영입자의 물리적 특성에 따라 다르게 나타나기 때문에 하나의 통일된 지배방정식으로 나타낼 수 없다. 그 동안 보다 정확한 비례관계를 얻기 위

Table 2. The SAR (Single-Aliquot Regenerative-Dose) procedure for equivalent dose estimation (Murray and Wintle, 2000)

| Step | Treatment ^a | Observed ^d |
|------|---|-----------------------|
| 1 | irradiation (regeneration dose), D _i | - |
| 2 | preheat ^b (160~300°C for 10s) | - |
| 3 | OSL measurement ^c (125°C for 40s) | L _i |
| 4 | irradiation (test dose), D _t | - |
| 5 | cut-heat ^b (160~220°C for 0s) | - |
| 6 | OSL measurement (125°C for 40s) | T _i |
| 7 | return to step 1 | - |

^a For the natural samples, i=0, and D₀ is the natural dose.

^b Samples cooled to less than 60°C after heating. In step 5, the TL signal from the test dose can be observed, but it is not made use of in routine applications.

^c The stimulation time depends upon the stimulation light intensity and wavelength.

^d L_i and T_i are derived from the initial 0.8s OSL signal minus a background estimated from the last part of the stimulation curve (in general, the last 4 s is used as a background)

해 많은 연구들이 수행되었고(e.g. Smith *et al.*, 1986; Murray *et al.*, 1997; Hilgers *et al.*, 2001) 최근에는 이 연구에 사용된 것과 같은 단일시료재현법(Murray and Wintle, 2000)이 가장 널리 이용되고 있다. 단일시료재현법을 이용하여 구한 등가선량은 석영이 퇴적기간동안 흡수한 총 방사선량을 의미하며, 단위시간당 석영입자가 퇴적물로부터 흡수하는 방사선량, 즉 연간선량(dose rate)을 측정한 후, 다음의 식(1)을 통해 OSL 연대를 계산할 수 있게 된다.

$$\text{OSL 연대}(ka) = \text{등가선량}(Gy) \div \text{연간선량}(Gy/ka) \quad (\text{식1})$$

시료 SC-6과 SC-9의 연간선량은 한국기초과학지원연구원에 설치된 저준위 고분해능 감마스펙트로미터를 이용하여 측정하였다. 감마스펙트로미터를 이용하여 측정된 각 핵종들의 농도는 Olley *et al.* (1996)에 의해 제시된 식에 의해 연간선량으로 변환되었다. 퇴적물 공극내의 수분함량이 연간선량에 미치는 영향은 Zimmerman(1971)이 제시한 자료에 의해 보정되었으며, 우주선(cosmic ray)에 의한 영향은 시료가 채취된 위도, 경도, 시료의 심도를 고려하여 0.25 ± 0.01 Gy/ka 로 계산되었다(Prescott and Hutton, 1988, 1994).

3.4 석영의 OSL 신호 특성

석영의 OSL 신호는 전술한 바와 같이 OSL 신호를 발생시키는 방식에 따라 크게 CW-OSL과 LM-OSL로 구분되며, 연대측정 대상시료의 OSL특성을 관찰하는 데에 유용하게 이용된다. 이 외에도, 시료를 수 μs 단위로 여기시켜 발생시키는 pulsed OSL (POS�; Bailiff, 2000)과 시료를 조사시키는 동안에 발생하는 Radioluminescence(RL; Poolton *et al.*, 2001)등이 있으나, 본 연구와의 연관성이 없으므로 이들에 대한 구체적인 서술은 생략하였다. CW-OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정하게 유지시켜 얻는 OSL 신호로서 그림 3(a)와 같이 시간에 따라 지수적으로 감소하는 곡선으로 나타난다. 격자내부 전하들의 re-trapping rate이 느리고, OSL 신호의 발생이 일차 반응역학(first-order kinetics)을 따른다고 가정하면, CW-OSL 곡선은 일반적으로 $I(t) = I_0 \exp(-\lambda t)$ 로 표현되며(여기에서, $I(t)$ 는 t 초에서의 CW-OSL 세기, I_0 는 초기 CW-OSL 세기, λ 는 감쇠상수, t 는 여

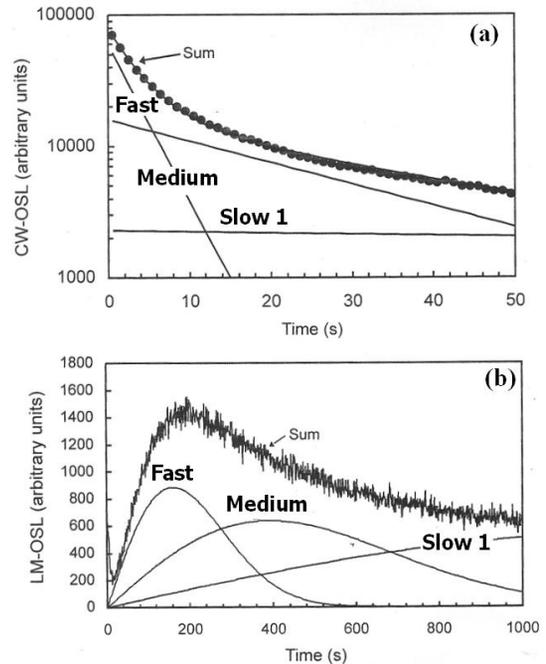


Fig. 3. (a) CW-OSL and (b) LM-OSL curves with their constituent OSL components(modified from Kuhns *et al.*, 2000).

기시간을 의미한다; Bøtter-Jensen *et al.*, 2003), CW-OSL 신호는 감쇠상수(λ)의 크기에 따라 3-4개의 OSL component로 나눌 수 있다(그림 3(a); Smith and Rhodes, 1994; Bailey *et al.*, 1997). CW-OSL신호와 달리 LM-OSL 신호는 여기광원의 세기를 일정시간동안 선형적으로 증가시켜가며 관찰되는 OSL 신호이다(Bulur, 1996). LM-OSL 신호는 빛에 민감한 순서, 즉, 광이온화단면적(σ , photoionisation cross-section, CW-OSL신호의 감쇠상수와 비례한다)이 큰 OSL component 순서에 따라 일련의 피크형태로 나타나며(그림 3(b)), 일반적으로 이 피크 중 광이온화단면적이 가장 큰 OSL component 부터 순서대로 fast, medium, slow1, slow2,...OSL component로 명명한다. 각 OSL component의 광이온화단면적크기는 실험자에 따라 약간의 차이가 있으나, 각 OSL component 마다 대체로 일정한 범위의 값을 가지고 있다(표 3). 실험실에서 얻은 LM-OSL 신호는, 일차 반응역학의 경우, $L(t) = n_0 b(t/P) \exp(-bt^2/2P)$ 로 표현이 된다(여기에서, $L(t)$ 는 t 초에서의 LM-OSL 세기, n_0 는 trap

Table 3. OSL components and their photoionisation cross-sections (σ , cm^2)

| Singarayer and Bailey (2003) | | Jain <i>et al.</i> (2003) ¹⁾ | | Choi <i>et al.</i> (2006b) | | This study ²⁾ | |
|------------------------------|-----------------------|---|-----------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Component | σ | Component | σ | Component | σ | Component | σ |
| Fast | 2.5×10^{-17} | Fast | 2.3×10^{-17} | Fast | 2.0×10^{-17} | Fast | not exist |
| Medium | 5.9×10^{-18} | Medium | 5.6×10^{-18} | Medium | 3.9×10^{-18} | Medium | 2.6×10^{-18} |
| | | Slow 1 | 1.3×10^{-18} | | | | |
| Slow 1 | 2.1×10^{-19} | Slow 2 | 2.1×10^{-19} | Slow 1 | 4.8×10^{-19} | Slow 1 | 4.6×10^{-19} |
| Slow 2 | 1.2×10^{-20} | Slow 3 | 2.1×10^{-20} | Slow 2 | 5.7×10^{-20} | Slow 2 | 8.1×10^{-20} |
| Slow 3 | 1.9×10^{-21} | Slow 4 | 2.8×10^{-21} | Slow 3 | 4.6×10^{-21} | Slow 3 | 7.1×10^{-21} |

¹⁾ Jain *et al.*(2003) identified 6 OSL components from their quartz samples, whereas other authors observed 5 OSL components from the samples they analysed. Jain *et al.*(2003)'s slow 2, slow 3, and slow 4 components correspond to slow 1, slow 2, and slow 3 component of other authors, respectively.

²⁾ The calculated photoionisation cross-sections are the mean values of those obtained from two quartz samples investigated in this study (SC-6 and SC-9).

된 전자의 갯수, P 는 총 여기시간, 그리고 b 는 de-trapping 확률을 의미하며, 이는 광이온화단면적 및 최대 여기광원세기와 비례한다). 전술한 바와 같이, 석영의 CW-OSL 신호 및 LM-OSL 신호는 광이온화 단면적이 서로 다른 OSL component로 구성되는데, 이들 OSL component 중 지질학적 시간동안 열적으로 안정하고(life time, $\tau > 1$ Ma), 가장 빛에 민감한 fast OSL component(광이온화단면적 $\sigma = \sim 10^{-17} \text{ cm}^2$)가 지배적인 시료가 OSL 연대측정에 가장 적합한 것으로 알려져 있다(Wintle and Murray, 2006). 참고로, 최근 fast OSL component 보다 광이온화 단면적이 큰 ultrafast OSL component가 보고되었으나($\sigma = 10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$), 이 OSL 신호는 자연상태의 석영에는 존재하지 않을 뿐만 아니라, 열적으로 불안정하여 OSL 연대를 과소평가하는 원인이 되므로 정확한 OSL 연대측정을 위해서는 적절한 열전처리를 통하여 제거되어야 한다(Choi *et al.*, 2003; Jain *et al.*, 2008).

이번 연구에서는 시료 SC-6과 SC-9의 OSL 신호 특성을 살펴보기 위하여, 각 시료를 청색광원으로 125°C 에서 40초동안 30 mW/cm^2 의 세기로 여기하여 CW-OSL 신호를 측정하였고, 이들의 특성을 좀 더 뚜렷이 파악할 수 있도록, 연대측정에 매우 적합한 것으로 널리 알려진 호주 타스마니아의 TNE9517 시료(Duller and Augustinus, 2006)와 fast OSL component가 존재하지 않아 일반적인 연대측정법에 적용하기 어려운 것으로 보고된 케냐열곡대시료(시료번호 ER4; Choi *et al.*, 2006b)의 OSL 신호와

비교하여 도시하였다(그림 4(a)와 (b)). SC-6과 SC-9의 CW-OSL 신호는 ER4의 CW-OSL 신호와 마찬가지로, TNE9517 시료에 비해 느린 감쇠곡선으로 나타난다. 이처럼 느린 감쇠율을 보이는 CW-OSL 신호는 측정초기에 지배적으로 방출되는 fast OSL component가 미약하거나 존재하지 않을 때 관찰된다.

시료 SC-6과 SC-9의 OSL 신호에서 fast OSL component가 차지하는 비율을 살펴보기 위해, 루미네선스 측정장비의 청색광원의 세기를 3600초 동안 0에서 30 mW/cm^2 까지 선형적으로 증가시켜가며(여기온도: 125°C), LM-OSL 신호를 얻었다(그림 4(c)와 (d)). 이후, 이들 LM-OSL 신호를 SigmaPlot™(ver.10.0)의 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 바탕으로, Choi *et al.*(2006c)에서 제시한 방법을 이용하여 각 OSL component로 분리하였다. LM-OSL 곡선의 회귀분석 결과 시료 SC-6과 SC-9의 OSL 신호에는 fast OSL component가 존재하지 않음을 알 수 있었으며, 이는 일반적으로 적용되는 단일시료재현법으로는 시료 SC-6과 SC-9의 정확한 OSL 연대를 구할 수 없음을 의미한다.

3.5 Dose Recovery Test

주어진 시료가 OSL 연대측정에 적합한 지를 알아보기 위하여 실시하는 여러 가지 실험 중 최근 가장 널리 적용되고 있는 방법이 dose recovery test이다(Murray and Wintle, 2003). Dose recovery test에서는 측정하고자 하는 시료를 실험실에서 청색광원 혹은 solar simulator에 일정시간동안 노출시켜

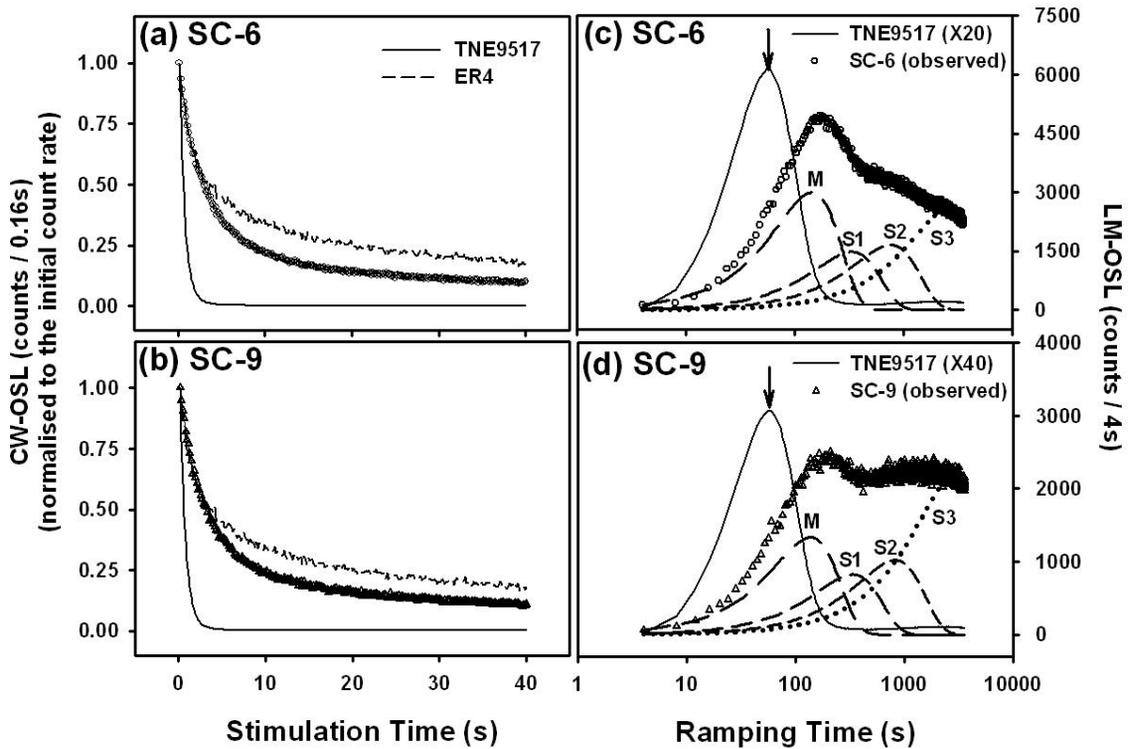


Fig. 4. (a-b) CW-OSL curves and (c-d) LM-OSL curves of the samples SC-6 and SC-9, together with those of TNE9517 and ER4 for comparison. LM-OSL signals of TNE9517 are almost entirely dominated by the fast OSL component (Duller and Augustinus(2006); more than 95% in the initial part of the CW-OSL signal), and the arrows in (c) and (d) indicate the expected location of the peak for the fast OSL component in TNE9517. In (c) and (d), it is clearly seen that there is no peak appearing around the arrow for the samples SC-6 and SC-9, which implies that the fast OSL component does not exist in both samples. M, S1, S2, S3 in (c) and (d) represent Medium, Slow 1, Slow 2, and Slow 3 OSL components, respectively.

자연적으로 축적된 OSL 신호(자연 OSL 신호, natural OSL signal)를 제거한 후, 루미네선스 측정장비에 부착된 베타선원으로 일정한 양의 방사선을 조사시킨다(이를 “실험실조사량(Given dose)”이라 한다). 이 후, OSL 연대측정에 사용되는 실험과정을 통하여 측정된 선량(이를 “회복선량(Recovered dose)”이라 한다)이 실험실조사량과 같은 지를 확인한다. 만일 주어진 시료가 OSL 연대측정에 적합한 시료라면, 회복선량은 실험실에서 임의로 가한 실험실조사량과 같아야 한다(즉, R/G (Recovered/Given) = 1.0).

원형구조도에서 채취한 시료들이 일반적인 단일 시료재현법을 이용한 OSL 연대측정에 적합한 지 여부를 알아보기 위하여, SC-6 시료에 대해 CW-OSL 신호를 이용한 두 종류의 dose recovery test를 실

시하였다. 먼저, SC-6시료를 3 mm 크기의 aliquot 32개로 나눈 후, 이들을 24시간동안 solar simulator에서 처리하여 자연 OSL 신호를 제거하고, 상온에서 베타선원으로 100 Gy의 방사선을 조사하였다(실험실조사량 = 100 Gy). 이 후, 단일시료재현법의 열전처리 온도(표 2의 step 2)를 160°C에서 28 0°C까지 20°C간격으로 올리며 회복선량을 측정하였다(각 열전처리 온도 당 4개의 aliquot 사용). 이 실험에서 실험실조사량은 모든 열전처리 온도 구간에서 10% 이상 과소평가 되었다(그림 5(a)). 특히, 열전처리 온도가 220°C 이상이 되면 실험실 조사량의 과소평가가 정도가 더욱 커지는 것을 알 수 있었다. 다음으로, 그림 5(a)의 실험에서 실험실조사량에 가장 근접한 결과(91 ± 7 Gy)를 얻을 수 있었던 열전처리 온도인 200°C를 사용하여, 0-150 Gy까지 50 Gy

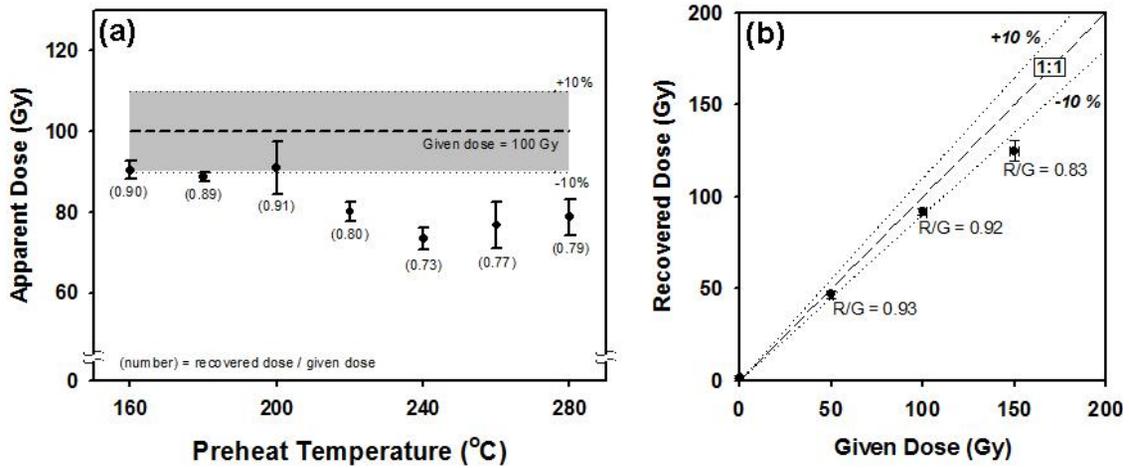


Fig. 5. Dose recovery tests using CW-OSL signal from the sample SC-6 as a function of (a) various preheat temperatures and (b) given doses.

간격으로 실험실조사량을 변화시켜 가며 dose recovery test를 실시하였다(각 실험실조사량 당 3개의 aliquot 사용). 이 실험에서도 실험실조사량은 7-17% 정도 과소평가되었으며, 실험실 조사량이 커질수록 과소평가의 정도도 커짐을 알 수 있었다(그림 5(b)).

시료 SC-6 및 SC-9와 같이 fast OSL component가 존재하지 않는 시료들이 일반적인 단일시료 재현법을 이용한 dose recovery test에서 실험실조사량을 과소평가하는 현상은 이미 Choi *et al.* (2006b)이 케냐열곡대의 석영시료에 대한 연구에서 보고한 바가 있다. 그러나, 이들은 각각의 OSL component를 분리하여 단일시료재현법을 적용할 수 있는 기존의 LM-OSL SAR법(Singarayer and Bailey, 2003)을 수정·보완하고, 이를 바탕으로 medium component($\sigma = \sim 10^{-18} \text{ cm}^2$)만을 이용한 dose recovery test를 실시하였다. 이들은 medium component를 이용한 dose recovery test에서 실험실조사량이 $\pm 5\%$ 내에서 비교적 정확하게 측정됨을 보고하고, fast OSL component가 존재하지 않는 시료에 대해서는 medium component만을 이용한 OSL 연대측정이 가능함을 제안하였다. 이번 연구에서도 원형구조토에서 채취한 시료들의 medium component만으로 OSL 연대측정이 가능한지 살펴보기 위하여 전술한 바와 같이 SC-6시료를 24시간 동안 solar simulator에서 처

리하여 자연 OSL 신호를 제거한 후, 100 Gy의 실험실 조사량을 가한 4개의 aliquot(8 mm)에 대해서 LM-OSL SAR법을 이용한 dose recovery test를 실시하였다(표 4, 그림 6). 실험결과, Choi *et al.* (2006b)이 보고한 것과는 달리 시료 SC-6의 medium OSL component를 이용하여 구한 회복선량은 83-95 Gy로서(평균 $91 \pm 6 \text{ Gy}$) CW-OSL 신호를 이용한 일반적인 단일시료재현법을 적용했을 때와 마찬가지로 실험실조사량을 약 10% 정도 과소평가 하였다.

Table 4. The LM-OSL SAR procedure for equivalent dose estimation using medium OSL component in quartz(Choi *et al.*, 2006b)

| Step | Treatment | Observed |
|------|--|----------|
| 1 | irradiation (regeneration dose), Di | - |
| 2 | preheat (at 260 °C for 10s) | - |
| 3 | LM-OSL measurement (at 125 °C for 3600s) | Li |
| 4 | Optical bleaching (at room T for 1000 s) | |
| 5 | irradiation (test dose), Dt | - |
| 6 | cut-heat (at 260 °C for 0s) | - |
| 7 | LM-OSL measurement (at 125 °C for 3600s) | Ti |
| 8 | Optical bleaching (at 180 °C for 1000 s) | |
| 9 | return to step 1 | - |

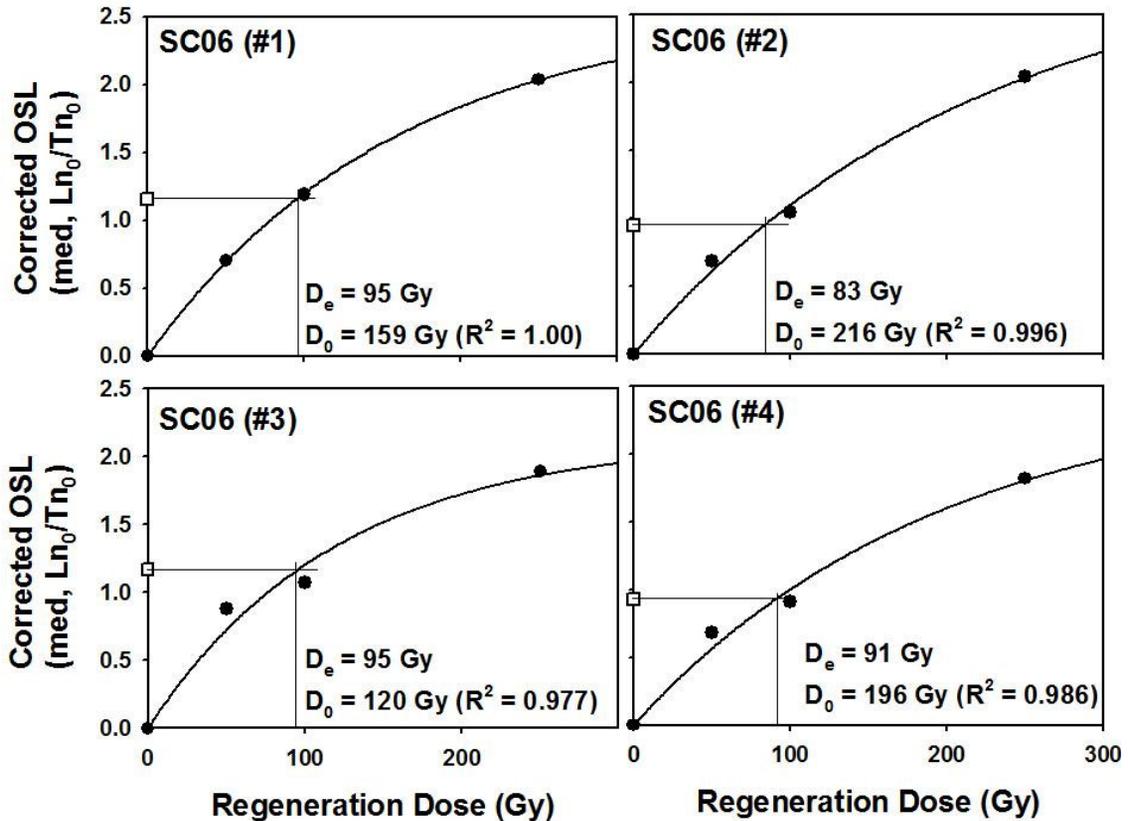


Fig. 6. Dose recovery test using LM-OSL signal from the sample SC-6. Each growth curve was fitted with saturating exponential equation, $I=I_0(1-\exp(-D/D_0))$, where D_0 is the characteristic dose which defines the curvature of the growth curve. Thus, characteristic dose is the parameter usually used for inferring the maximum D_e value that can be safely determined with a growth curve(generally up to $2D_0$).

4. OSL 연대결과 및 토의

4.1 등가선량 분포

시료 SC-6과 SC-9에서 분리한 석영입자들을 3 mm 크기의 aliquot 48개로 나누어 OSL 연대측정을 실시하였다(표 5, 그림 7). 석영의 CW-OSL 신호는 시료를 125°C에서 40초동안 30 mW/cm²의 청색광원으로 여기시키며 측정되었다. 등가선량 결정을 위한 단일시료재현법에서는 dose recovery test에서 가장 실험실조사량에 가까운 회복선량을 구할 수 있었던 실험조건인 200°C/10s의 재현선량 열전처리조건과 200°C/0s의 시험방사선 열전처리조건을 적용하였다(그림 5(a) 참조). SC-6, SC-9과 같이 medium OSL component가 우세한 시료에서는 OSL 신호의 회귀현상(recuperation)이 OSL 연대

결과에 심각한 영향을 미칠 수도 있다(Watanuki *et al.*, 2005). 본 연구에서는 이러한 회귀현상을 최소화하기 위하여 단일시료재현법의 각 단계의 마지막과정(표 2의 Step 6과정) 이후에 시료를 다시 220°C에서 40초동안 여기광원으로 처리하는 과정을 추가하여 등가선량을 구하였다(Murray and Wintle, 2003).

원형구조토가 입자의 활발한 수평적, 수직적 이동으로 형성되기 때문에, 빙하후퇴 직후, 원형구조토 내 석영입자들의 자연 OSL 신호가 다른 빙하퇴적물 내의 석영입자들 보다 완벽하게 블리칭(bleaching)이 될 가능성이 높긴 하지만, 여전히 완벽하게 블리칭되지 않은 입자들이 존재하여, 실제 퇴적된 이후 주변퇴적물로부터 받은 방사량보다 높은 등가선량 값이 나타날 수 있다. 즉, 실제 퇴적연대보다 오래된 연대를 나타낼 가능성이 여전히 존재한다. 따라서,

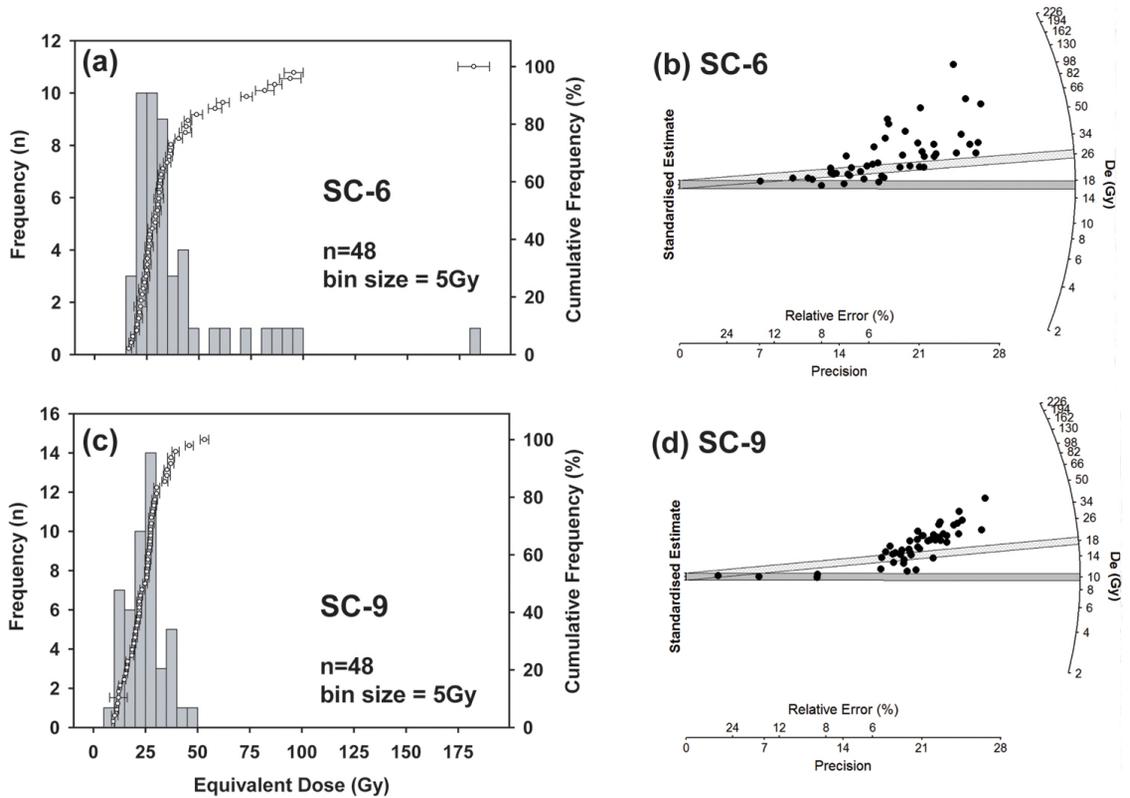


Fig. 7. Dose distribution of the samples SC-6 and SC-9. The grey and black bands in (b) and (d) were drawn using weighted mean D_e and "Lowest 5%" D_e as reference values, respectively.

Table 5. Equivalent dose values and OSL ages of the samples based on various statistical approaches.

| Sample code | Dose Rate* (Gy/ka) | Mean D_e (Gy)** (OSL age, ka) | Weighted Mean D_e (Gy) (OSL age, ka) | "Lowest 5%" D_e (Gy) (OSL age, ka) | "Lowest 10%" D_e (Gy) (OSL age, ka) |
|-------------|--------------------|------------------------------------|---|---|--|
| SC-6 | 1.72±0.05 | 39±4 (23±2) | 26±1 (15±1) | 17±1 (10±1) | 19±1 (11±1) |
| SC-9 | 1.64±0.05 | 25±1 (15±1) | 18±1 (11±1) | 10±1 (6±1) | 11±1 (7±1) |

*Dose Rates were modified using present water contents. Cosmic ray contributions were calculated using the equations given by Prescott and Hutton(1988, 1994)

**Errors in D_e and OSL ages are 1σ standard errors.

본 시료들의 OSL 연대값은 석영 OSL신호의 불완전한 블리칭으로 인한 오해석 가능성을 최소화하기 위하여, 여러 통계학적 방법을 통하여 구한 등가선량값을 바탕으로 추정되었다(표 5). SC-6시료의 등가선량은 16 Gy-180 Gy 범위의 값을 보이며, 낮은 등가선량방향으로 치우친 분포를 보여(그림 7(a)) 분석

된 시료들이 완벽하게 블리칭되지 않았을 것으로 생각된다. 이와는 달리 SC-9시료의 등가선량은 9 Gy-53 Gy 범위의 정상분포를 보이고 있어(그림 7(c)) 퇴적이후 원형구조토가 형성되는 동안 자연 OSL 신호의 블리칭이 SC-6에 비해 "비교적" 잘 이루어진 것으로 판단된다.

Galbraith *et al.*(1999)은 OSL 연대측정에 사용된 각 aliquot의 등가선량분포를 표현하는 방법으로, 분석정밀도와 상대오차를 고려한 방사도(radial plot)의 사용을 제안하였다(그림 7(b)와 (d) 참고). 방사도에서는 각 aliquot의 등가선량(y축)을 분석정밀도와 상대오차(방사도의 x축)와 함께 도시한다. 그리고, 임의로 선택된 참고값(reference value, 일반적으로 시료의 평균등가선량 혹은 가중평균등가선량값을 참고값으로 사용한다)의 2σ 표준오차구간을 도시하여, 분석된 시료가 퇴적당시 완벽하게 블리칭 되어 있는지를 확인하는 수단으로 사용하기도 한다. 즉, 분석하고자 하는 시료가 퇴적당시 완벽하게 블리칭되어 등가선량분포가 정상 가우스 분포(normal Gaussian distribution)를 보인다면, 이론적으로는 분석된 aliquot의 95%가 참고값과 2σ 표준오차를 연결한 구간에 포함되어야 한다(Bøtter-Jensen *et al.*, 2003); 하지만, 실제로는 인위로 완벽하게 블리칭시킨 시료라도 분석오차, 시료의 민감도(sensitivity change)차이 등 여러 요인에 의해서 분석된 aliquot의 약 85% 전후만이 이 구간에 포함되는 경우가 많다. 이를 토대로, SC-6과 SC-9 시료의 각 aliquot의 등가선량 값을 방사도에 도시하여 보면(그림 7(b)와 (d)), 가중평균을 참고값으로 한 구간(방사도의 회색구간) 바깥쪽에 약 60% 정도의 aliquot이 위치하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 7(c)의 히스토그램에서 뚜렷한 치우침(skewness)을 보이지 않아 “비교적” 블리칭이 잘 되었다고 판단되었던 SC-9시료도 모든 시료들이 동일하게, 그리고 완벽하게 블리칭되었다고 하기에는 어려움이 있음을 의미한다.

이처럼 완벽한 블리칭을 장담할 수 없는 시료들을 이용하여 정확한 OSL 연대측정을 구하기 위한 여러 가지 통계학적 연대모델이 제시되어 왔다(Galbraith *et al.*, 1999; Lepper and McKeever, 2002). 특히, Olley *et al.*(1998)은 이미 퇴적연대가 잘 알려진 하성퇴적물에 대한 OSL 연대측정연구를 통해 퇴적당시 블리칭이 완벽하게 되지 않은 퇴적물의 경우 등가선량값 중 하위 5%의 평균값(“Lowest 5% D_e value”)이 신뢰성 있는 OSL 연대자료임을 제시한 바가 있다. 그러나, Bailey and Arnold(2006)는 수치모델을 통하여 등가선량의 하위 5% 평균값은 실제 퇴적연대를 과소평가한다는 보고를 하였으며, 이 보

다는 등가선량의 가중평균값을 이용한 OSL 연대값이 실제 퇴적연대에 가깝다는 것을 제안하였다.

4.2 OSL 연대결과

3.5.절 dose recovery test에서 fast OSL component가 존재하지 않는 SC-6과 SC-9시료들을 단일 시료재현법에 적용하여 얻어진 회복선량은 실험실 조사량의 10% 미만이었다. Li and Li(2006)는 석영의 OSL신호를 구성하는 각 component를 이용하여 등가선량을 측정하고, medium OSL component를 이용한 등가선량이 fast OSL component를 이용하여 구한 값보다 항상 작음을 관찰하였다. 이들은 medium OSL component를 야기하는 트랩(trap)이 열적으로 안정되어 있다는 기존의 견해(>100 Ma; Singarayer and Bailey, 2003; Choi *et al.*, 2006b)와는 달리 시료에 따라 medium OSL component가 열적으로 불안정하여 초기 CW-OSL 신호가 주로 medium OSL component로 구성되어 있을 경우에는 측정된 등가선량이 실제보다 낮을 수 있음을 보고하였다. 아직까지 본 연구에 사용된 시료들의 회복선량이 실험실조사량보다 10% 이상 작은 것에 대한 명확한 원인을 알 수는 없지만, Li and Li(2006)가 제시한 바와 같이 medium OSL component의 열적 불안정성에서 기인한 것일 가능성이 있다. 한편으로, 그림 5에서 제시된 실험실조사량의 과소평가 정도는 열전처리 온도가 낮아짐에 따라, 그리고 실험실조사량이 작아짐에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는, 퇴적된 이후 시료가 실제로 흡수한 방사선량이 작았을 경우(예를 들어, SC-9시료와 같이 50 Gy 미만)에는 단일시료재현법에 의해 측정된 등가선량값이 실제 시료의 흡수방사선량을 과소평가하는 정도가 10% 미만일 가능성도 있음을 의미한다. 그러나, 3.5. 절에서 실시한 dose recovery test 실험의 어떤 경우라도 실험실 조사량의 과대평가(overestimation)는 관찰되지 않았다. 따라서, “4.1. 등가선량의 분포”에서 제시한 SC-6과 SC-9 시료의 등가선량 값들이 시료의 흡수선량을 과대평가하여 실제보다 오래된 OSL 연대(overestimated OSL ages)를 제시할 가능성은 없는 것으로 판단된다. 이와 같은 dose recovery test결과를 고려하면, 이번 연구에서 제시하는 OSL 연대는 빙하가 후퇴하

고 남은 퇴적물들이 원형구조토를 형성한 이후 경과한 연대(퇴적연대)라기 보다는, 이들 일련의 사건보다 젊은 연대, 즉, 빙하후퇴시기의 하한을 지시하는 것으로 해석되어야 할 것이다.

SC-6과 SC-9 등가선량값의 평균, 가중평균, 하위 5%(Lowest 5%)의 평균, 그리고 하위 10%(Lowest 10%)의 평균 등 여러 가지 방법을 통하여 구한 OSL 연대는 SC-6의 경우 23 ± 2 ka에서 10 ± 1 ka의 범위를, SC-9는 15 ± 1 ka에서 6 ± 1 ka의 범위를 보인다(표 5). 전술한 바와 같이(4.1. 절 참조), 이 두 시료 중 SC-9시료는 완벽하지는 않지만 상대적으로 SC-6시료에 비해 블리칭이 잘된 것으로 생각된다(그림 7). 또한, Bailey and Arnold(2006)의 수치모델결과를 참고한다면, SC-9와 같은 등가선량분포를 보이는 시료에서는 등가선량의 단순한 평균값이나, 하위 5%(혹은 10%)의 평균값보다는 가중평균 등가선량값(weighted mean D_e)를 바탕으로 한 OSL 연대결과(11 ± 1 ka)를 취하는 것이 타당하다. 따라서, 남극 세종기지 인근에서 채취한 두 원형구조토의 OSL 연대자료로부터 추정된 이 지역 빙하의 후퇴는 적어도 11 ± 1 ka 이전에 일어났을 것으로 판단된다. 이 결과는 남셰틀랜드 군도(South Shetland Islands)인근 시료들의 방사성탄소연대측정결과를 바탕으로 제안된 기존 연대인 약 5 ka(Björck *et al.*, 1998; Yoon *et al.*, 2000) 보다는 빙하의 후퇴가 좀 더 이른 시기에 일어났을 가능성을 의미하며, John(1972)과 Sugden and Clapperton(1986)이 제안한 약 10 ka 정도의 빙하후퇴시기와는 잘 일치한다.

5. 결론

이번 연구에서는 킹조지섬 세종기지 인근에 분포하는 원형구조토내 석영의 OSL 신호특성을 살펴보고, 이를 바탕으로 원형구조토에 대한 OSL 연대측정결과와 고기후학적 적용(빙하후퇴시기의 결정)가능성에 대해 살펴보았다. 연구를 위해 채취된 두 개의 시료들은 모두 fast OSL component가 존재하지 않았으며, 단일시료재현법을 이용한 dose recovery test에서도 회복선량은 실험실조사량의 10% 미만이었다. 따라서, 대상시료의 OSL 연대결과는 엄밀한 의미에서 빙하후퇴에 따른 빙하퇴적물의 퇴적시기라기 보다는 빙하후퇴시기의 하한을 지시한다. OSL

연대측정에 사용된 두 개의 시료(SC-6과 SC-9) 중 SC-9는 SC-6에 비해 퇴적후 원형구조토의 형성과 정동안 햇빛에 의한 블리칭이 상대적으로 잘 되었던 것으로 생각되나, 모든 석영입자가 동일하게, 그리고 완벽하게 블리칭되지는 않은 것으로 판단된다. SC-9시료의 가중평균 등가선량값을 바탕으로 한 OSL 연대결과는 11 ± 1 ka로서, 이는 킹조지섬 세종기지 인근의 빙하후퇴가 적어도 11 ± 1 ka 이전에 일어났을 가능성을 의미한다.

킹조지섬 세종기지 인근에 분포하는 원형구조토에 대한 이번 연구결과는, 최근 들어 활발하게 논의되고 있는 다양한 등가선량의 통계처리 기법(예를 들어, "central age model", "minimum age model" 혹은 "leading edge model")들을 보다 많은 시료의 OSL 연대자료에 적용한다면 원형구조토에 대한 OSL 연대측정결과를 빙하후퇴시기에 대한 지시자(proxy)로서 유용하게 사용할 수 있음을 시사한다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소 사업인 "지구온난화 대응책 마련을 위한 극지역 고기후 및 고해양변화 복원기술 개발사업"(과제번호 PE08010)과 환경부의 "차세대 핵심 환경기술 개발사업(Eco-technopia 21 project)"의 지원으로 수행되었다. 논문을 세심하게 심사해 주시고, 건설적인 조언을 해주신 강원대학교 홍덕균교수와 고려대학교 성영배 박사께 감사의 말을 전합니다.

참고문헌

- 최정현, 정창식, 장호완, 2004, 석영을 이용한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정의 원리와 지질학적 적용. 지질학회지, 40, 567-583.
- Alexanderson, H. and Murray, A.S., 2007, Was southern Sweden ice free at 19-25 ka, or were the post LGM glacial fluvial sediments incompletely bleached? Quaternary Geochronology, 2, 229-236.
- Bailey, R.M. and Arnold, L.J., 2006, Statistical modelling of single grain quartz D_e distribution and an assessment of procedures for estimating burial dose. Quaternary Science Reviews, 25, 2475-2502.
- Bailey, R.M., Smith, B.W. and Rhodes, E.J., 1997, Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL. Radiation Measurements, 27, 123-136.

- Bailiff, I.K., 2000, Characteristics of time-resolved luminescence in quartz. *Radiation Measurements*, 32, 401-405.
- Ballantyne, C. and Matthews, J., 1983, Desiccation cracking and sorted polygonal development, Jotunheimen, Norway. *Actic and Alpine Research*, 15, 339-349.
- Björck, S., Malmer, N., Hjort, C., Sandgren, P., Ingólfsson, Ó., Wallén, B., Smith, R.I.L. and Jónsson, B.L., 1998, Stratigraphic and paleoclimatic studies of a 5500-year-old moss bank on Elephant Island, Antarctica. *Arctic and Alpine Research*, 23, 361-374.
- Bøe, A.-G., Murray, A. and Dahl, S.O., 2007, Resetting of sediments mobilised by the LGM ice-sheet in southern Norway. *Quaternary Geochronology*, 2, 222-228.
- Bøtter-Jensen, L., McKeever, S.W.S. and Wintle, A.G., 2003, *Optically stimulated luminescence dosimetry*. Elsevier, 355 p.
- Bøtter-Jensen, L. and Murray, A.S., 1999, Developments in optically stimulated luminescence techniques for dating and retrospective dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 84, 307-315.
- Bulur, E., 1996, An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment. *Radiation Measurements*, 32, 141-145.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.-S. and Chang, H.W., 2003, 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., 2006a, Estimation of equivalent dose using quartz isothermal TL and the SAR procedure. *Quaternary Geochronology*, 1, 101-108.
- Choi, J.H., Duller, G.A.T., Wintle, A.G. and Cheong, C.-S., 2006b, Luminescence characteristics of quartz from the Southern Kenyan Rift Valley: Dose estimation using LM-OSL SAR. *Radiation Measurements*, 41, 847-854.
- Choi, J.H., Duller, G.A.T. and Wintle, A.G., 2006c, Analysis of quartz LM-OSL curves. *Ancient TL*, 24, 9-20.
- Duller, G.A.T. and Augustinus, P.C., 2006, Reassessment of the record of linear dune activity in Tasmania using optical dating. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2608-2618.
- Dumond, D.E. and Griffin, D.G., 2002, Measurements of the marine reservoir effect on radiocarbon ages in the Eastern Bering Sea. *Arctic*, 55, 77-86.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H. and Olley, J.M., 1999, Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinnium rock shelter, northern Australia: Part I, Experimental design and statistical models. *Archaeometry*, 41, 339-364.
- Goldthwait, R.P., 1976, Frost-sorted patterned ground: A review. *Quaternary Research*, 6, 27-35.
- Hallet, B. and Prestrud, S., 1986, Dynamics of periglacial sorted circles in western Spitsbergen. *Quaternary Research*, 26, 81-99.
- Haugland, J.E., 2004, Formation of patterned ground and fine-scale soil development within two late Holocene glacial chronosequences: Jotunheimen, Norway. *Geomorphology*, 61, 287-301.
- Hilgers, A., Murray, A.S., Schlaak, N. and Radtke, U., 2001, Comparison of quartz OSL protocols using Lateglacial and Holocene dune sands from Brandenburg, Germany. *Quaternary Science Reviews*, 20, 731-736.
- Hjort, C., Björck, S., Ingólfsson, Ó. and Möller, P., 1998, Holocene deglaciation and climate history of the northern Antarctic Peninsula region: a discussion of correlations between the Southern and Northern Hemisphere. *Annals of Glaciology*, 27, 110-112.
- Jain, M., Choi, J.H. and Thomas, P., 2008, The ultrafast OSL component in quartz: Origins and Implications. *Radiation Measurements*, 43, 709-714.
- Jain, M., Murray, A.S. and Bøtter-Jensen, L., 2003, Characterisation of blue-light stimulated luminescence components in different quartz samples: implications for dose measurement. *Radiation Measurements*, 37, 441-449.
- Jeong, G.Y., 2006, Radiocarbon ages of sorted circles on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Antarctic Science*, 18, 265-270.
- John, B.S., 1972, Evidence from the South Shetland Islands towards a glacial history of West Antarctica. In: Sugden, D.E., Price, R.J. (Eds.), *Polar Geomorphology*. Institute of British Geographers, pp. 75-92.
- Kessler, M.A., Murray, A.B., Werner, B.T. and Hallet, B., 2001, A model for sorted circles as self-organized patterns. *Journal of Geophysical Research*, 106, 13, 287-13, 306.
- Kessler, M.A. and Werner, B.T., 2003, Self-organization of sorted patterned ground. *Sciences*, 299, 380-383.
- Krantz, W.B., 1990, Self-organization manifest as patterned ground in recurrently frozen soil. *Earth Science Reviews*, 29, 117-130.
- Kuhns, C.K., Larsen, N.A. and McKeever, S.W.S., 2000, Characteristics of LM-OSL from several different types of quartz. *Radiation Measurements*, 32, 413-418.
- Lepper, K. and McKeever, S.W.S., 2002, An objective methodology for dose distribution analysis. *Radiation Protection Dosimetry*, 101, 349-352.
- Li, B. and Li, S.-H., 2006, Comparison of D_e estimates using the fast component and the medium component of quartz OSL. *Radiation Measurements*, 41, 125-136.
- Martini, I.P., Brookfield, M.E. and Sadura, S., 2001,

- Principles of glacial geomorphology and geology. Prentice Hall, 381 p.
- Matsuoka, N., Abe, M. and Ijiri, A., 2003, Differential frost heave and sorted patterned ground: field measurements and a laboratory experiment. *Geomorphology*, 52, 73-85.
- Matthews, J.A., Shakesby, R., Berrisford, M. and McEwen, L., 1998, Periglacial patterned ground on the Styggedalsbreen glacier foreland, Jotunheimen, southern Norway: micro-topographic, paraglacial and geoecological controls. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 147-166.
- Murray, A.S. and Olley, J.M., 2002, Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria*, 21, 1-16.
- Murray, A.S., Roberts, R.G. and Wintle, A.G., 1997, Equivalent dose measurement using a single aliquot of quartz. *Radiation Measurements*, 27, 171-184.
- 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.
- Olley, J.M., Caitcheon, G. and Murray, A.S., 1998, The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews*, 17, 1033-1040.
- 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.
- Poolton, N.R.J., Bulur, E., Wallinga, J., Bøtter-Jensen, L., Murray, A.S. and Willumsen, F., 2001, An automated system for the analysis of variable temperature radioluminescence. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 179, 575-584.
- Prescott, J.R. and Hutton, J.T., 1988, Cosmic ray and gamma ray dosimetry for TL and ESR. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 14, 223-227.
- Prescott, J.R. and Hutton, J.T., 1994, Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term variations. *Radiation Measurements*, 23, 497-500.
- Rhodes, E.J. and Pownall, L., 1994, Zeroing of the OSL signal in quartz from young glaciofluvial sediments. *Radiation Measurements*, 23, 329-333.
- Rhodes, E.J., 2000, Observation of thermal transfer OSL signals in glacial quartz. *Radiation Measurements*, 32, 595-602.
- Singarayer, J.S. and Bailey, R.M., 2003, Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation. *Radiation Measurements*, 37, 451-458.
- Smith, B.W., Aitken, M.J., Rhodes, E.J., Robinson, P.D. and Geldard, D.M., 1986, Optical dating: Methodological aspects. *Radiation Protection Dosimetry*, 17, 229-233.
- Smith, B.W. and Rhodes, E.J., 1994, Charge movements in quartz and their relevance to optical dating. *Radiation Measurements*, 23, 329-333.
- Sugden, D.E. and Clapperton, C.M., 1986, Glacial history of the Antarctic Peninsula and South Georgia. *South African Journal of Science*, 82, 508-509.
- Wallinga, J., Murray, A.S., Duller, G.A.T. and Tornqvist, 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.
- Watanuki, T., Murray, A.S. and Tsukamoto, S., 2005, Quartz and polymineral luminescence dating of Japanese loess over the last 0.6 Ma: Comparison with an independent chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 240, 774-789.
- 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.
- Yoon, H.I., Han, M.W., Park, B.-K., Oh, J.-K. and Chang, S.-K., 1997, Glaciomarine sedimentation and palaeo-glacial setting of Maxwell Bay and its tributary embayment, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Marine Geology*, 140, 265-282.
- Yoon, H.I., Park, B.K., Kim, Y. and Kim, D., 2000, Glaciomarine sedimentation and its paleoceanographic implications along the fjord margins in the South Shetland Islands, Antarctica during the last 6000 years. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 157, 189-211.
- Zimmerman, D.W., 1971, Thermoluminescent dating using fine grains from pottery. *Archaeology*, 13, 29-52.

투 고 일 : 2008년 3월 3일

심 사 일 : 2008년 3월 10일

심사완료일 : 2008년 4월 15일