

## 퇴적물 내 석영의 광여기 루미네선스 특성과 미량원소 조성

### Trace Element Compositions and Optically Stimulated Luminescence Characteristics of Sedimentary Quartz

정 기 영(Gi Young Jeong)<sup>1,\*</sup> · 최 정 현(Jeong-Heon Choi)<sup>2</sup> · 길 영 우(Youngwoo Kil)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원 오창센터 환경과학연구부

(Division of Earth and Environmental Sciences, Ochang Center, Korea Basic Science Institute,  
804-1 YangCheong, Ochang, Cheongwon, Chungbuk 363-883, Korea)

<sup>3</sup>한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 석영의 광여기 루미네선스(OSL)를 이용한 제4기 퇴적물의 연대측정이 최근 널리 적용되고 있다. 그러나 모든 석영시료가 OSL 연대측정에 적합하지는 않다는 사실도 잘 알려져 있다. OSL 연대측정의 신뢰도를 향상시키고 적용범위를 넓히기 위해서는 석영시료별로 다양한 OSL 신호 특성의 원인에 대한 광물학적 규명이 필요하다. 본 연구는 그러한 광물학적 연구의 일환으로 전혀 다른 지질 및 지표 환경에서 채취한 퇴적물 시료로부터 분리한 석영을 대상으로 OSL 신호특성 분석과 레이저작마 유도결합플라즈마질량분석(LA-ICP-MS)을 이용한 미량원소 조성분석을 실시하였다. OSL 신호 분석 결과, 석영시료는 연대 측정에 적합한 신호특성을 갖는 시료와 부적합한 시료로 명확히 분리할 수 있었다. 미량원소조성분석 결과, Al (평균 73~267 ppm)과 Ti (평균 61~248 ppm)의 함량이 가장 높았으며, 그 외 Li, Mg, Cr, Mn, Fe 등이 40 ppm 미만으로 함유되어 있었다. 석영 시료간 OSL 특성의 명확한 차이에도 불구하고, 그에 상응하는 미량원소함량의 뚜렷한 차이는 발견할 수 없었다. 이는 시료별로 다양한 OSL 신호 특성이 미량원소가 아닌 석영의 다른 광물학적 원인에 기인되었을 가능성을 시사하지만, 향후 보다 많은 시료 분석으로 확인되어야 한다.

주요어 : 석영, OSL, LA-ICP-MS, 미량원소

**ABSTRACT** : Optically stimulated luminescence (OSL) of quartz is commonly applied to the age dating of Quaternary sediments. However, one of the issues is that some of the quartz samples are not suitable to OSL dating. Mineralogical analysis of the quartz samples with diverse OSL signals are required to strengthen the reliability and applicability of the OSL dating. We analysed the OSL signal characteristics of sedimentary quartz samples from diverse geological environments and measured their trace element contents using laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). Quartz samples could be grouped into ones suitable to OSL dating and ones unsuitable on the basis of their OSL signal characteristics. The average trace element contents ranged from 73 to 260 ppm (Al), and from 61 to 248 ppm (Ti) with minor Li, Mg, Cr, Mn, and Fe contents below 40 ppm.

\*교신저자: jearth@andong.ac.kr

We did not find any significant variation of trace element contents of quartz samples consistent with their OSL signal characteristics. This indicates unknown mineralogical factors causing diverse OSL characteristics which should be confirmed by further analysis of sufficient set of samples.

**Key words** : Quartz, OSL, LA-ICP-MS, trace elements

## 서 론

석영은 지각의 12%를 차지하는 주요 광물로서, 광범위한 온도/압력조건 및 화학조성의 지질환경을 지시할 수 있는 매우 중요한 광물이다. 따라서 석영을 암석 또는 퇴적물의 지질사 이해에 이용하기 위한 다양한 연구들이 시도되고 있다. 그 중에서도 최근 석영으로부터 방출되는 광여기 루미네선스(Optically Stimulated Luminescence, 이하 OSL) 신호를 이용한 미고결 퇴적물의 제4기 연대측정(Aitken, 1998; Wagner, 1998; Murray and Olley, 2002; Duller, 2004)이 주목을 받고 있다. 이는 주로 석영입자가 다른 광물들에 비해 가장 간단한 격자 및 화학구조를 지니고 있어, 이로부터 발생하는 OSL 신호특성의 이해 및 정의가 쉽기 때문이다. 석영을 이용한 OSL 연대측정법은 Murray and Wintle (2000, 2003)이 단일시료재현법(Single-Aliquot Regenerative-Dose 법; 이하, SAR법)을 제안하면서, 연대결과의 신뢰도가 크게 향상되었다. 이후로, SAR법을 기본적인 실험법으로 적용하여 지난 10여 년 동안 제4기 연대측정을 필요로 하는 여러 학문분야에 활발히 적용되고 있다(예: Tsukamoto *et al.*, 2009a, b). 하지만, 최근 동일한 실험조건에서도 서로 다른 물리적 특성의 OSL 신호를 방출하는 석영입자들이 보고되고 있으며, 이러한 특성을 보이는 석영입자의 일부는 연대측정에 적합하지 않은 OSL 신호를 지니고 있는 것으로 알려져 있다(예: Choi *et al.*, 2003a, b; Watanuki, 2005; Wintle and Murray, 2006; Steffen *et al.*, 2009; Fan *et al.*, in press).

석영이 제4기 연대측정대상을 위한 광물로서 유용성과 중요성을 지니고 있음에도 불구하고, 이로부터 방출되는 OSL 신호에 대해서는 루미네선스 현상을 이해하기 위해 일반적으로 적용되는 Energy Level 이론 외에(예: Aitken, 1985), 실제로 OSL 신호의 발생과 관련한 격자내부의 광물학적 및 지구 화학적 변화에 대한 연구는 전무한 상태이다. 따라서, 석영의 OSL 신호를 이용한 연대측정의 정밀도

과 정확도를 제고하기 위해서는 지질환경별 석영의 OSL 신호를 정밀하고도 체계적으로 분석해야 할 필요성이 OSL 연대측정학계에서 제기되고 있다. OSL 신호 특성에 영향을 미치는 요소로서 석영 내 미량 원소의 농도, 격자구조, 각종 물리적 결함, 내포물 등을 들 수 있고, 이 중 가장 중요한 원인이 석영 내 Si를 치환하는 각종 미량원소들로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 연대측정에 적합한 것으로 알려진 석영과 그렇지 못한 석영을 대상으로 미량 원소 조성을 한국기초과학지원연구원에 최근 도입된 레이저작마유도결합플라즈마질량분석(LA-ICP-MS; Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) 장비로 분석하여, 각 석영입자들의 미량원소함량과 OSL 신호특성사이의 관계를 살펴 보았다.

## OSL 연대 측정

여러 무기물 중 절연체 혹은 반도체는 외부에서 여러 형태의 에너지(예를 들어, 자연방사선, 마찰, 빛, 화학에너지 등)를 흡수한 후 외부자극(빛 혹은 열)에 노출이 되면 흡수한 에너지를 다양한 파장의 빛으로 방출하는 성질을 지닌다. 이때, 방출되는 다양한 파장의 빛을 루미네선스(luminescence)라고 하며, 특히 물질에 빛의 형태로 외부자극을 가하여 얻어진 루미네선스를 OSL이라고 한다(McKeever, 1985). Huntley *et al.* (1985)은 퇴적물에 포함된 석영입자로부터 방출되는 OSL 신호가 석영입자가 흡수한 이온화방사선(ionizing radiation)량, 즉 석영입자가 퇴적되어 햇빛으로부터 차단된 이후 주변 광물로부터 흡수한 자연방사선량과 비례함을 관찰하였고, 이로부터 본격적인 OSL 연대측정이 시작되었다. 즉, 퇴적물에서 분리한 석영입자가 방출하는 OSL 신호의 양을 측정함으로써 석영입자가 햇빛으로부터 차단된 이후 흡수한 이온화방사선의 총량(이를 “등가선량”, Equivalent Dose라 한다; 단위 “Gy”)을 추정할 수 있으며, 이를 석영입자가 주변퇴적물

로부터 흡수하는 단위시간당 에너지(이를 “연간선량”, Dose Rate라 한다; 단위 “Gy/ka”)로 나누어 석영입자가 포함된 퇴적층의 연대를 결정한다.

최근 OSL 연대측정법은 제4기(특히, 후기플라이스토세에서 현재) 퇴적층의 연대측정에 폭넓게 적용되고 있으며(Murray and Olley, 2002; Duller, 2004), 연대결과의 신뢰도 향상(Demuro *et al.*, 2008; Rodnight, 2008)과 연대측정가능범위의 확장(예: Fattahi and Stokes, 2005; Choi *et al.*, 2006c; Wang *et al.*, 2006)을 위한 여러 가지 실험적/이론적 노력이 활발하게 진행되고 있다.

### 시료 및 실험

본 연구를 위하여 이미 연대측정이 시도된 4개의 시료를 선정하였다. 0011KS-1은 경북 경주시 양남면 수림리 관성해변의 해안단구를 이루는 모래시료이며, TNE9517는 호주 태즈메니아(Tasmania) 풍성사구 모래 시료, ER4은 케냐 열곡의 Enderit 강 퇴적물, SC08은 남극 킹조지섬 세종기지 주변의 빙하퇴적물 시료이다. 0011KS-1 및 TNE9517 시료의 OSL 신호는 OSL 신호를 구성하는 요소 중 fast OSL component가 가장 지배적으로 이루어져 있으며, 이미 연대측정에 매우 적합한 시료로 잘 알려져 있다(Choi *et al.*, 2003a,b; Duller and Augustinus, 2006). 반면에, ER4와 SC08은 그 OSL 신호특성이 연대측정에 적합하지 않은 것으로 보고된 시료들이다(Choi *et al.*, 2006a; 최정현 외, 2008). 이는 fast OSL component의 열적안정성(thermal stability)이 상온조건에서 수백만년으로 다른 OSL component들에 비해 높고(Singarayer and Bailey, 2003), 또한 빛에 민감하게 반응하여 루미네선스신호를 빠른 속도로 방출시키기 때문에 퇴적물에 대한 OSL 연대측정 초기조건(complete bleaching)을 만족시킬 가능성이 높기 때문이다.

석영 OSL 신호의 물리적 특징은 일반적으로 CW (continuous Wave) OSL 신호나 LM (Linearly Modulated) OSL 신호를 측정하여 정의할 수 있다. CW-OSL과 LM-OSL 신호에 대한 자세한 설명은 최정현 외(2008)의 “3.4. 석영의 OSL 신호특성”에 기술되어 있으나, 간략하게 서술하자면 다음과 같다. CW-OSL 신호는 OSL 신호를 방출시키기 위한 여기광원의 세기를 일정하게 유지하면서 측정된 OSL 신호를 의미한다. CW-OSL 신호는 지수적으로 감쇠하는 곡선으로 나타나며, 이 곡선은 각기 다른

감쇠율을 가지는 여러 지수감쇠곡선으로 분리될 수 있다(Bailey *et al.*, 1997). CW-OSL 신호의 감쇠율은 OSL 신호를 구성하는 각 OSL component의 구성비율에 따라 달라진다. 즉, OSL 연대측정에 가장 적합한 것으로 알려진 fast OSL component가 우세할수록 CW-OSL 신호의 감쇠율은 커지며, fast OSL component가 적을수록 CW-OSL 신호의 감쇠율은 낮아지게 된다.

LM-OSL 신호는 여기광원의 세기를 선형적으로 증가시키면서 측정된 OSL 신호를 의미한다. 이 때, OSL 신호는 각 OSL component의 광이온화단면적(photoionization cross-section) 크기의 순서대로 일련의 피크로 나타나며, 각 피크가 나타나는 순서에 따라 fast, medium, slow 1, slow 2.... OSL component로 OSL 신호를 세분할 수 있다(Choi *et al.*, 2006b). OSL 연대측정에 적합한 시료는 일반적으로 열적으로 안정한 fast OSL component가 우세한 시료를 의미한다.

본 연구를 위한 CW-OSL 신호와 LM-OSL 신호 측정은 한국기초과학지원연구원에 설치된 루미네선스 자동측정장비(Model: TL/OSL-DA-20)를 이용하여 수행되었다. 여기광원으로는 루미네선스 측정 장비에 부착된  $470 \pm 30$  nm 파장의 청색광원을 사용하였으며, 이 광원을 사용하여 약  $40 \text{ mW/cm}^2$ 의 에너지로 시료를 여기(stimulation)시킬 수 있다. 또한, 기기에 장착되어 있는  $^{90}\text{Sr}$  베타선원을 이용하여 시료를 조사(irradiation)하였다.

석영입자의 CW-OSL 신호는 자연시료(natural samples)를  $260^\circ\text{C}$ 에서 10초 동안 열전처리(preheating)한 후, 청색광원으로 40초 동안 여기시키며 측정하였다(count rate = cts/0.16s). LM-OSL 신호는  $260^\circ\text{C}$ 에서 10초 동안 열전처리한 자연시료들을 이용하여 3,600초 동안 청색광원의 세기를  $0 \sim 40 \text{ mW/cm}^2$ 까지 증가시키며 측정하였다(count rate = cts/4s).

분리된 석영 입자의 일부는 에폭시로 굳힌 후, 연마 박편을 제작하였다. 석영의 미량원소분석은 LA-ICP-MS로 분석하였다. 석영입자의 미량원소는 213 nm의 New Wave사 UP213 레이저와 Thermo Elemental사 ICP-MS (X7)가 연결된 LA-ICP-MS를 이용하여 한국기초과학지원연구원에서 분석하였다. 미량원소 분석에는 NIST612가 외부표준물질(external standard)로 이용되었고, 석영 내 규소 함량을 이용하여 내부 표준법(internal standard method)으로 보정하였다. 분석한 원소는 석영에서 Si를 치환하거나 간극에 들어가는 것으로 알려진 Li, Mg,

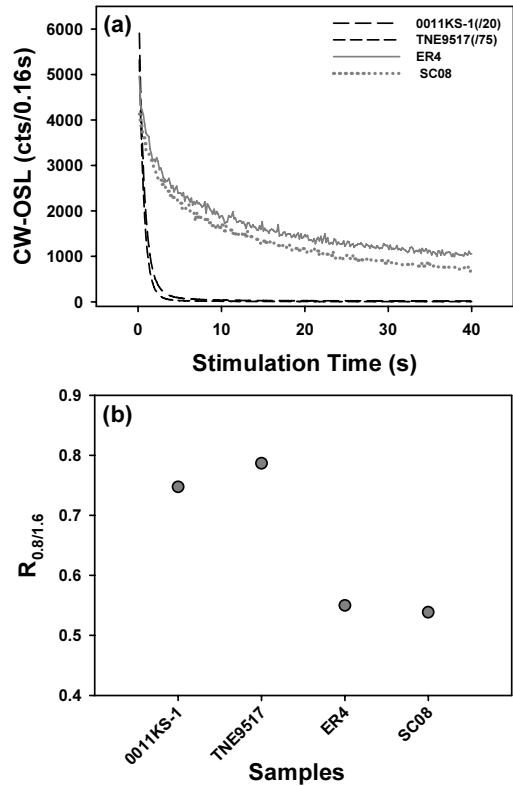
Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Ge이었다. 분석조건은 반복율 5 Hz, 빔 크기 40  $\mu\text{m}$ , 펄스 에너지 8.0 J/cm<sup>2</sup>이며 분석시 피크시간과 배경시간은 각각 45초 및 30초이다. 분석 값은 버지니아공대의 AMS 프로그램을 이용하여 계산되었다.

### 결 과

일정한 세기의 청색광원으로 여기시켜 발생하는 CW-OSL 신호의 초기에는 fast OSL component가 지배적이지만, 여기시간이 지날수록 상대적으로 빛에 덜 민감한 medium, slower OSL component들의 기여가 점차 커지게 된다. 따라서, 전술한 바와 같이 fast OSL component가 우세한 시료, 즉 연대측정에 적합한 시료는 CW-OSL 신호의 감쇠율이 non-fast OSL component가 우세한 시료보다 크다. 이는 CW-OSL 신호의 초기 0~0.8초 동안 측정된 신호와 0~1.6초 동안 측정된 신호의 비(이를 본 연구에서는 “ $R_{0.8/1.6}$ 비”라 한다)를 통하여 정량화 할 수 있다. 시료의 상태 및 각 실험자에 따라, 조금씩 차이는 있지만, 0~0.8초 동안의 초기 CW-OSL 신호는 OSL 연대측정을 위해 일반적으로 사용되는 신호범위이다. 그림 1a에서 나타난 바와 같이, 연대측정에 적합한 것으로 알려져 있는 두 시료 0011KS-1과 TNE9517의 CW-OSL 신호는 연대측정에 적합하지 않은 다른 두 개의 시료에 비해 높은 감쇠율을 보이며, 이들의  $R_{0.8/1.6}$  값은, ER4와 SC08에 비해 약 35% 정도 높게 나타난다(0.7~0.8; 그림 1b). 이는 0011KS-1과 TNE9517로부터 방출되는 CW-OSL 신호가 ER4와 SC08에 비해 fast OSL component 구성 비율이 높으며, 따라서 OSL 연대측정에 보다 더 적합한 시료임을 간접적으로 나타낸다.

그림 2는 4개 석영 시료의 LM-OSL 곡선이다. OSL 연대측정에 적합한 0011KS-1 및 TNE9517의 LM-OSL 곡선은 50초 부근에서 최대값이 관찰되고 있어서, 소위 “fast OSL component”가 우세하다. 반면에 OSL 연대측정이 잘 되지 않는 ER4 및 SC08 시료들은 0011KS-1, TNE9517과 동일한 실험조건(주로, 동일한 기기에 부착된 여기광원)으로 LM-OSL 신호를 측정하였음에도 불구하고, 50초 부근에서 뚜렷한 피크가 발견되지 않아, 이들 두 시료의 fast OSL component는 매우 미약하거나, 전혀 존재하지 않을 가능성을 나타낸다.

표 1~4는 각각 0011KS-1, TNE9517, ER4, SC08 시료의 LA-ICP-MS 분석값이다. 시료 중에서 ER4



**Fig. 1.** (a) CW-OSL decay curves of sedimentary quartz separated from diverse geological environments. Each decay curve was read out under blue-LED stimulation for 40 s at 125°C, followed by a preheat treatment at 260°C for 10 s. CW-OSL signals of the samples 0011KS-1 and TNE9517 were demagnified by a factor of 20 and 75, respectively. (b)  $R_{0.8/1.6}$  values of CW-OSL curves.

시료의 경우, 장석이나 유색광물의 함량이 높아서 의미있는 분석 결과는 2개 입자에서만 얻었다. 4시료 모두 Al (평균 73~267 ppm)과 Ti (평균 61~248 ppm)의 함량이 높았다. 0011KS-1 및 TNE9517 시료에서는 Al의 평균 함량이 Ti보다 2~3배 정도 높았으나, ER4 및 SC08 시료에서는 Al과 Ti의 함량이 비슷하였다. 그 외 다른 원소들은 Al이나 Ti 함량의 약 1/10 이하로 함유되어 있다. Li과 Mg의 평균 함량 범위는 각각 12~24 ppm 및 5~37 ppm이었으며, TNE9517을 제외한 시료들에서 거의 모든 입자들에 분석한계 이상으로 함유되어 있었다. Cr, Mn, Fe는 분석된 입자별로 함량의 변화가 비교적 심한데, 특히 Fe는 대부분 검출한계 이하로 함

**Table 1.** Trace element compositions of quartz (0011KS-1) measured by LA-ICP-MS (ppm)

Analysis no.	Li	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ge
1	26	2	96	143	0	0	0	0
2	14	78	340	40	0	37	124	0
3	22	3	97	91	0	0	0	0
4	20	14	138	99	0	0	46	0
5	17	0	81	63	0	0	0	0
6	17	4	85	64	0	14	0	0
7	12	5	96	91	0	0	0	0
8	9	443	360	101	0	4	83	0
9	17	0	90	86	0	0	0	0
10	15	37	1,770	78	0	0	62	0
11	8	0	74	76	0	8	0	0
12	17	8	115	121	0	0	0	0
13	11	15	111	134	0	0	67	0
14	11	6	119	133	0	81	98	0
15	8	8	135	96	0	0	0	0
16	9	18	993	102	0	1	0	0
17	5	5	311	49	0	4	0	0
18	5	34	90	55	0	0	0	0
19	27	5	108	74	0	0	35	0
20	30	8	139	68	0	0	0	0
Average	15	35	267	88	0	7	26	0

**Table 2.** Trace element compositions of quartz (TNE9517) measured by LA-ICP-MS (ppm)

Analysis no.	Li	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ge
3	0	9	46	19	0	0	0	0
4	4	12	385	291	0	0	0	0
5	0	0	85	50	0	0	0	0
6	0	65	301	69	5	2	155	0
7	155	4	1,069	375	0	5	151	0
8	161	90	1,033	405	4	3	189	0
10	0	100	88	16	5	0	0	0
11	4	0	49	40	0	0	0	0
12	5	0	48	60	0	0	0	0
13	0	0	32	203	0	0	0	0
14	0	11	38	34	0	0	0	0
16	0	0	51	28	0	0	0	0
17	4	37	78	44	7	0	0	0
18	0	196	142	63	7	0	0	0
Average	24	37	246	121	2	1	35	0

유되어 있으나, 함유될 경우 함량이 흔히 100 ppm을 초과한다. 몇몇 입자들의 경우, Li, Al, Ti의 함

**Table 3.** Trace element compositions of quartz (ER4) measured by LA-ICP-MS (ppm)

Analysis No.	Li	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ge
14	12	0	79	64	12	0	0	0
15	13	10	67	58	8	0	0	0
Average	12	5	73	61	10	0	0	0

**Table 4.** Trace element compositions of quartz (SC08) measured by LA-ICP-MS (ppm)

Analysis No.	Li	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ge
1	17	26	205	147	0	0	0	0
2	9	7	103	72	0	56	221	3
3	4	15	313	1,291	0	0	44	0
4	21	7	100	172	0	24	0	0
5	11	137	699	205	13	0	0	0
6	18	59	147	178	6	0	0	0
7	5	70	428	243	7	0	125	0
8	59	161	776	305	61	0	0	0
10	39	41	255	296	4	2	0	0
12	0	0	22	17	4	0	0	0
13	0	35	216	16	0	0	0	0
14	5	6	81	326	0	0	0	0
15	10	8	160	180	0	12	0	0
16	21	5	95	175	0	0	0	0
17	20	12	322	305	0	0	0	0
18	21	6	86	190	0	0	0	0
19	46	6	160	188	0	0	97	0
20	28	29	262	155	0	4	0	0
Average	19	35	246	248	5	5	27	0

량이 다른 다수의 입자들에 비하여 매우 높다(예, 0011KS의 10번, TNE9517의 7,8번, SC08의 3번).

석영의 미량원소는 Si를 치환하여 격자의 일부를 이루거나, 전하보상이온으로서 격자 사이의 빈 공간에 들어갈 수 있다. 석영에 극미량으로 함유된 원소들 중에서 Al<sup>3+</sup>, Ge<sup>4+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, P<sup>5+</sup> 등은 Si를 치환하며, Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>는 전하결손을 상쇄하며 격자간극에 존재하는 것으로 알려져 있다(Weil, 1984, Goetze *et al.*, 2001). 이번 분석에서는 Si를 치환하는 이온으로서 Al, Ge, Ti, Fe, 그리고 격자간극 이온으로서 Li만이 분석되었다. Ge은 거의 함유되어 있지 않고, Fe는 부분적으로 함유되어 있었다. Si 치환 이온인 Ti와 격자 간극이온인 Li은 양

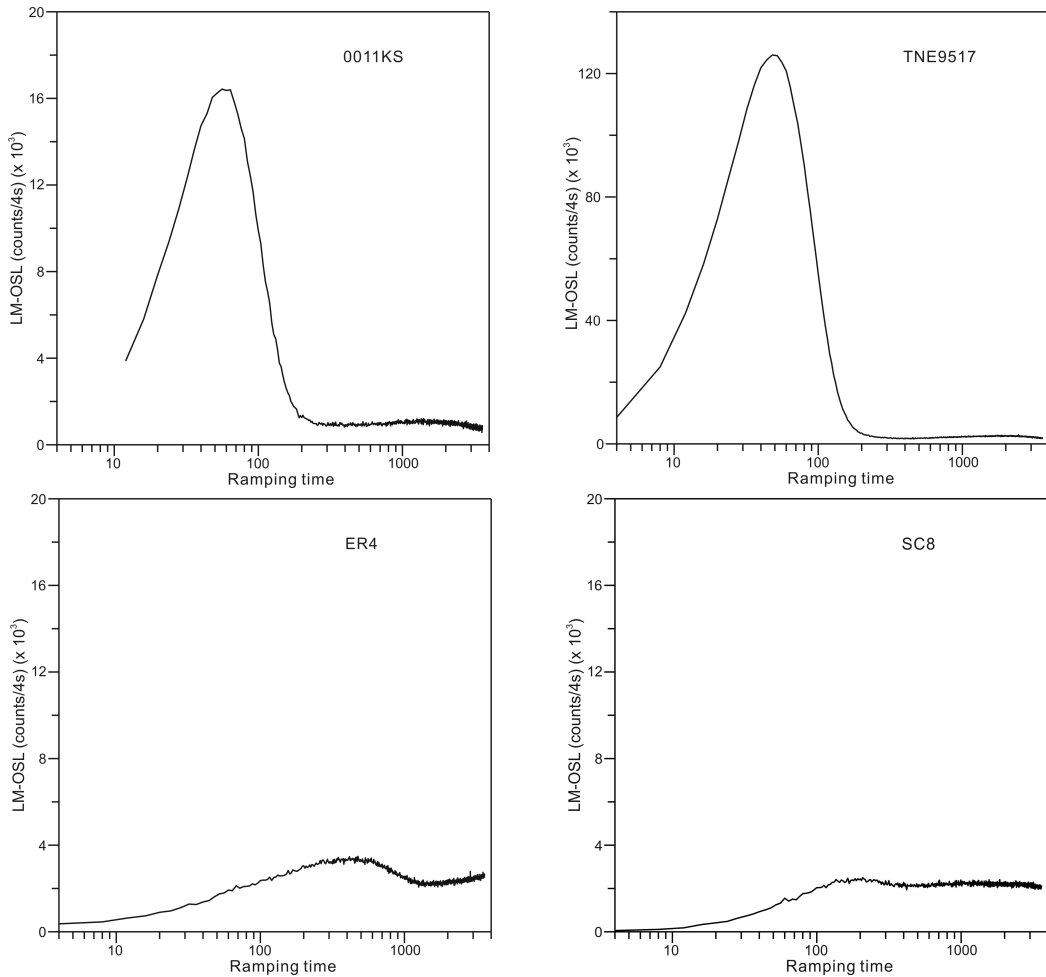


Fig. 2. LM-OSL curves of sedimentary quartz separated from diverse geological environments.

호한 정의 상관관계를 보이고 있다(그림 3). Al과 Li도 분산이 심하긴 하지만 정의 상관관계를 보인다. 그러나 Ti과 Li의 정의 상관관계는 설명하기 어렵다. 왜냐하면  $Ti^{4+}$ 가 격자를 치환한다면, 전하 보상이 필요하지 않기 때문이다. 이는 아마도 Al의 함량이 높으면 Ti의 함량도 높아지기 때문으로 해석된다(그림 3).  $Al^{3+}$ 이나  $Ti^{4+}$  등의 큰 미량 이온들이 Si를 치환하기 위해서는 고온의 환경이 필요하다.

석영의 입자별 미량원소 분석은 주로 전자현미 분석(EPMA), 이차이온질량분석(SIMS), LA-ICP-MS 분석법이 이용된다(Mueller *et al.*, 2003). EPMA 법은 검출한계값이 크고, 장시간의 계수가 필요하며, SIMS는 분석을 위한 석영표준시료를 확보하기 어려운 단점이 있어서, 공간분해능이 낮기는 하지만,

검출한계값이 낮고, 자료처리가 쉬운 LA-ICP-MS 법이 선호되고 있다(Mueller *et al.*, 2003). 이번 연구에서 분석된 미량원소함량은 대체로 기존에 보고된 LA-ICP-MS 분석자료의 범위와 부합된다(Mueller *et al.*, 2003; Flem *et al.*, 2002; Rusk *et al.*, 2006). 석영 시료들의 산지가 전혀 다를 것을 고려하면, 미량원소들의 함량 차이가 크다고 할 수 없으며, 이는 다른 광물에 비하여 견고하고 질서정연한 석영의 격자가 수용할 수 있는 미량원소의 함량에 한계가 있기 때문으로 판단된다.

이번 분석에 사용된 석영 입자들은 퇴적물로부터 분리되었다. 따라서 퇴적물 근원지의 지질이 시료별로 다양할 뿐만 아니라, 같은 시료에서도 다양한 생성 역사를 갖는 석영입자들이 혼합되어 있을

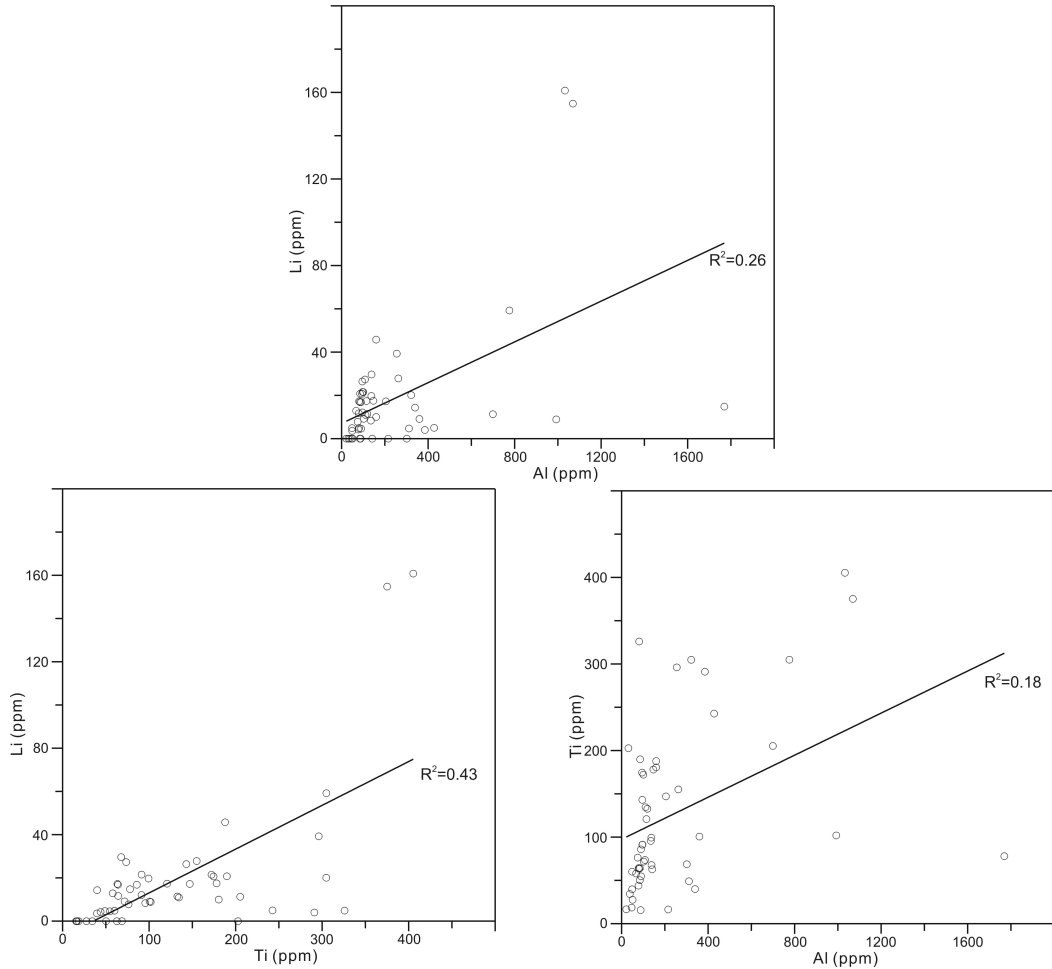


Fig. 3. Correlation of Al, Ti, and Li contents of sedimentary quartz grains measured by LA-ICP-MS.

것이다. 특히 열수 석영의 경우에는 미량원소의 분대현상이 있는 것으로 알려지고 있다. 예를 들어 *Perny et al. (1992)*은 열수 석영 내 성장태들의 Al, Li, Na 분포를 측정한 결과, 큰 함량변화를 관찰하였고, *Rusk et al. (2006)*은 미량원소 특히 Ti 함량이 석영 생성온도와 직접적으로 관련있는 것으로 해석하였다. *Muller et al. (2003)*는 화성 석영과 열수 석영의 음극발광특성과 미량원소조성에 대한 연구로부터 음극발광강도와 Ti 함량 사이에 정의 상관관계가 있으며, 화성석영의 Ti함량이 열수 석영의 Ti함량보다 작다고 하였다. 따라서 표 1~4에서 관찰되는 미량원소함량의 변화, 특히, 몇몇 입자에서 Al, Ti, Li 등의 높은 함량은 미량원소분대현상이 있는 동일 모입자로 떨어져 나온 석영 입자들일

가능성도 있다. 물론 퇴적물 근원지에 존재하는 서로 다른 지질단위들로부터 유래한 것일 수도 있다.

이번 연구로부터 연대측정에 적합한 시료들과 부적합한 시료들의 CW- 및 LM-OSL 신호가 상이함을 알 수 있었으나, 미량원소함량과의 관계는 불명확하다. 분석된 LA-ICP-MS 자료와 비교하면, OSL 신호의 특성이 특정 미량원소와 관련성이 있다는 증거는 확보하지 못하였다. 따라서 미량원소함량이 아닌 어떤 광물학적 요인(e.g. 적층결함, 전위 등의 구조적 결함, 수분, 미량원소의 균질한 분산 또는 군집)이 다양한 OSL 신호 특성에 영향을 미쳤을 가능성이 제기된다. 그러나 본 분석에 이용된 4개의 시료수가 작고, 각 시료별 LA-ICP-MS 분석수가 충분하지 않다고 판단되기 때문에, 현 단계

에서 OSL 신호 특성과 석영 미량원소 사이의 관계를 선분리 단정하기는 어렵다.

## 요약 및 결론

상이한 지질 및 지표 환경에서 채취한 4개 퇴적물 내 석영 시료를 대상으로 OSL 신호특성 분석과 LA-ICP-MS 미량원소조성을 분석을 실시하여 상호 관련성을 비교하였다. 석영 시료는 CW-OSL 및 LM-OSL 신호 특성에 따라 연대 측정에 적합한 시료와 부적합한 시료로 명확히 분리할 수 있었다. 석영 미량원소의 LA-ICP-MS 분석 결과, Al (평균 73~267 ppm)과 Ti (평균 61~248 ppm)의 함량이 가장 높았으며, 그 외 Li, Mg, Cr, Mn, Fe 등이 소량(40 ppm 미만) 함유되어 있었다. 석영 시료별로 OSL 특성이 명확히 구분됨에도 불구하고, 그에 상응하는 미량원소함량의 뚜렷한 특성은 발견할 수 없었다. 따라서 미량원소의 다른 광물학적 요인이 다양한 OSL 신호 특성에 영향을 미쳤을 가능성이 높으며, 이는 향후 보다 많은 시료 분석을 실시하여 확인되어야 한다.

## 사 사

이 연구는 한국연구재단의 일반연구지원사업(기본연구-구 기초연구과제지원사업: KRF-2008-313-C00927)의 지원을 받아 수행되었다. 원고를 심사하여 주신 두 분의 심사위원께 감사의 말씀을 드린다.

## 참고문헌

- 최정현, 임현수, 윤호일, 정창식, 임창복, 김종욱, 장호완 (2008) 남극 킹조지섬에 분포하는 원형구조토(Sorted Circles)에 대한 OSL 연대측정 적용가능성 연구. *지질학회지*, 44, 523-539.
- Aitken, M.J. (1985) *Thermoluminescence Dating*. Academic Press.
- Aitken, M.J. (1998) *An Introduction to Optical Dating*. Oxford University Press, Oxford.
- Bailey, R.M., Smith, B.W., and Rhodes, E.J. (1997) Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL. *Radiat. Meas.*, 27, 123-136.
- 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. *Quat. Sci. Rev.*, 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 the luminescence ages of marine terrace sediments from Korea. *Quat. Sci. Rev.*, 22, 1201-1206.
- Choi, J.H., Duller, G.A.T., Wintle, A.G., Cheong, C.-S. (2006a) 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. (2006b) Analysis of quartz LM-OSL curves. *Ancient TL*, 24, 9-20.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Cheong, C.S., Hong, D.G., and Chang, H.W. (2006c) Estimation of equivalent dose using quartz isothermal TL and the SAR procedure. *Quat. Geochronol.*, 1, 101-108.
- 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. *Quat. Geochronol.*, 3, 346-364.
- Duller, G.A.T. (2004) Luminescence dating of Quaternary sediments: recent advances. *Journal of Quaternary Sciences*, 19, 183-192.
- 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.
- Fan, A., Li, S.H., and Li, B. Observation of unstable fast component in OSL of quartz. *Radia. Meas. in press.*
- Fattahi, M. and Stokes, S. (2005) Dating unheated quartz using a single aliquot regeneration-dose red thermoluminescence (SAR RTL). *Journal of Luminescence*, 115, 19-31.
- Flem, B., Larsen, R.B., Grimstvedt, A., and Mansfeld, J. (2002) In situ analysis of trace elements in quartz by using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chemical Geology*, 182, 237-247.
- Goetze, J., Plotze, M., and Habermann, D. (2001) Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz: a review. *Mineralogy and Petrology*, 71, 225-250.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., and Thewalt, M.L.W. (1985) Optical dating of sediments. *Nature*, 313, 105-107.
- McKeever, S.W.S. (1985) *Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press.
- Muller, A., Wiedenbeck, M., Van den Kerkhof, A.M.,



- Kronz, A., and Simon, K. (2003) Trace elements in quartz-A combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICPMS, and cathodoluminescence study. *Eur. J. Miner.*, 15, 747-763.
- 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. and Wintle, A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiat. Meas.*, 32, 57-73.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G. (2003) The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.*, 37, 377-381.
- Perry, B., Eberhardt, P., Ramseyer, K., Mullis, J., and Pankrath, R. (1992) Microdistribution of Al, Li, and Na in  $\alpha$ -quartz: Possible causes and correlation with short-lived cathodoluminescence. *American Mineralogist*, 77, 534-544.
- Rusk, B.G., Reed, M.H., Dilles, J.H., and Kent, A.J.R. (2006) Intensity of quartz cathodoluminescence and trace-element content in quartz from the porphyry copper deposit at Butte, Montana. *American Mineralogist*, 91, 1300-1312.
- Rodnight, H. (2008) How many equivalent dose values are needed to obtain a reproducible distribution? *Ancient TL*, 26, 3-9.
- Singarayer, J.S. and Bailey, R.M. (2003) Further investigations of the quartz optically stimulated luminescence components using linear modulation. *Radiat. Meas.*, 37, 451-458.
- Steffen, D., Preusser, F., and Schlunegger, F. (2009) OSL quartz age underestimation due to unstable signal components. *Quat. Geochronol.*, 4, 353-362.
- Tsukamoto, S., Duller, G.A.T., Murray, A.S., and Choi, J.H. (Eds.) (2009) "Luminescence Dating in Geomorphology" *special issue in Geomorphology*, vol. 109.
- Tsukamoto, S., Duller, G.A.T., Murray, A.S., and Choi, J.H. (Eds.) (2009) "Luminescence: Analysis of Quaternary Tectonic Movements and Environmental Change" *Special issue in Quaternary International*, vol. 199.
- Wagner, M.J. (1998) *Age Determination of Young Rocks and Artifacts*. Springer, Berlin.
- Wang, X.L., Lu, Y.C., and Wintle, A.G. (2006) Recuperated OSL dating of fine-grained quartz in Chinese loess. *Quat. Geochronol.*, 1, 89-100.
- 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.
- Weil, J.A. (1984) A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Phys. Chem. Miner.*, 10, 149-165.
- 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. *Radiat. Meas.*, 41, 369-391.

---

접수일(2010년 12월 1일), 수정일(1차 : 2010년 12월 18일),  
게재확정일(2010년 12월 21일)