

루미네선스 연대측정 상호비교를 위한 국제공동연구 결과 고찰

김진철*

한국지질자원연구원 제4기환경연구센터

Review of International Research Cooperation Results for Intercomparison of Luminescence Dating

Jin Cheul Kim*

Quaternary Environment Research Center,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약 : 덴마크 리소(Risø) 연구소에서 진행한 국제 공동 연구 프로젝트인 루미네선스 연대측정 상호비교 프로젝트는 등가선량, 연간선량, 그리고 절대연대 결과를 동일 시료를 대상으로 실험실마다 도출하여 실험실 간에 결과 값의 상호 비교와 신뢰도를 평가한 프로젝트로 2006년도부터 2012년도 까지 진행되었다. 이번 프로젝트에서는 전 세계 30개 실험실이 참여하였고 한국지질자원연구원(KIGAM)의 루미네선스 실험실도 포함된다. 프로젝트 종합 결과, 대체적으로 연대결과의 평균값은 약 13% 내의 실험실 간 과대산포(over-dispersion)값을 보인다. KIGAM에서 분석된 provided quartz를 통하여 얻어진 등가선량 값은 프로젝트 최종 등가선량 값과 거의 일치하는 결과를 보인다. 반면, self-extracted quartz로부터 얻어진 등가선량 값은 프로젝트 최종 결과 값과 약 0.9Gy의 차이를 보이는데 이는 분리된 석영의 입자 크기 차이 등에 기인한다고 생각된다. 이번 국제 공동 연구 프로젝트는 루미네선스 연대측정과 관련하여 진행된 첫 번째 대규모 국제 공동 연구로 국제적으로 루미네선스 연대측정의 신뢰도와 활용에 기여하였을 것으로 생각된다.

주요어 : 루미네선스, 연대측정, 국제공동연구, 상호비교 프로젝트

Abstract : The Risø Research Institute in Denmark conducted the luminescence dating intercomparison project, which derives equivalent dose, annual dose, and absolute age results for each laboratory from the same sample, and compares the results between laboratories. This project was carried out from 2006 to 2012. In this project, 30 international laboratories worldwide participated, including the luminescence laboratory at the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM). As a result of the project's synthesis, the average value of the results generally shows an over-dispersion

* Corresponding Author: Jin Cheul Kim, Quaternary Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea, kjc76@kigam.re.kr

value between laboratories of about 13%. The equivalent dose value obtained through the provided quartz analyzed in KIGAM shows results almost identical to the final equivalent dose value of the project. On the other hand, the equivalent dose value obtained from self-extracted quartz analyzed in KIGAM shows a difference of about 0.9 Gy from the final result of the project, which is thought to be due to the difference in particle size of the separated quartz. This international joint research project is the first large-scale international joint study related to luminescence dating and is expected to have contributed to the reliability and use of luminescence dating internationally.

Key words : luminescence, age dating, intercomparison project, international research cooperation

1. 서론

루미네선스 연대측정 상호비교 프로젝트(Laboratory Intercomparison Project)는 덴마크 리소(Risø) 연구소가 주축이 되어 전 세계 루미네선스 실험실에 동일 시료들을 제공한 후 그 결과 값을 종합해서 상호 비교 분석하는 프로젝트이다. 이번 연구에서는 루미네선스 연대측정과 관련하여 2006년도부터 2012년도까지 진행되었던 상호비교 프로젝트에 관한 전반적인 내용들을 소개하고자 한다. 상호비교 프로젝트는 전 세계적으로 약 30개 기관에서 보내온 결과 값들을 바탕으로 통계 분석하여 2011년 8월 LED(Luminescence and ESR Dating) 학회와 2015년도 Radiation Measurements 저널에 그 결과가 발표되었다(Murray *et al.*, 2015). KIGAM에서 분석한 결과 값은 Risø 연구소의 최종적인 통계 분석에 활용되었다. 이번 논문에서는 KIGAM에서 측정한 분석 값과 Risø 연구소가 취합하여 발표했던 종합적인 결과 값 사이의 차이점 및 유사점 그리고 분포 경향에 대하여 논의하였다.

2. 루미네선스 연대측정의 기본 원리

열을 이용하여 시료를 가열하면서 연대측정에 사용되는 루미네선스 시그널을 얻는 열적루미네

선스(TL: Thermoluminescence) 연대측정법에 비하여 광여기루미네선스(OSL: Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법은 빛을 광물에 조사하여 루미네선스를 얻는 방식이다. 광물(석영 또는 장석)이 가지고 있는 루미네선스 시그널은 퇴적물이 운반되는 과정 중에서 빛에 노출되어 완전히 제거(bleaching)되어야 한다. 이후 마지막 퇴적된 시점부터 광물이 자연방사선(Th, U, K⁴⁰)에 노출됨에 따라서 광물 격자 결합(trap)에 전자가 집적된다. 집적된 전자는 광물이 빛에 노출되기 전까지 오랜 시간 동안 안정한 상태로 놓이며 자연방사선에 노출된 시간에 비례하게 전자가 격자 결합에 집적된다. 집적된 전자는 빛이나 열의 조사를 통해서 루미네선스의 형태로 방출된다. 이는 전자가 격자결합에서 재조합 센터(recombination center)로 회귀할 때 발생한다(McKeever and Chen, 1997). 방출되는 전자의 양은 퇴적된 시간에 비례하며 이를 광전자 증배관(photomultiplier)에서 측정해서 선량 값으로 환산한다. OSL의 경우 격자결합에 집적되는 전자의 물리적 특성이 매우 단순하며 빛에 민감하기 때문에 퇴적물이 운반되는 과정 중에서 빛에 10초 정도만 노출되어도 기준에 가지고 있던 전자를 모두 잃게 된다. 따라서 루미네선스 연대측정의 기본 가정인 완벽한 시그널 소멸이 이루어지기 좋은 조건을 갖는다(Godfrey-Smith *et al.*, 1988). 뤼스(Loess)나

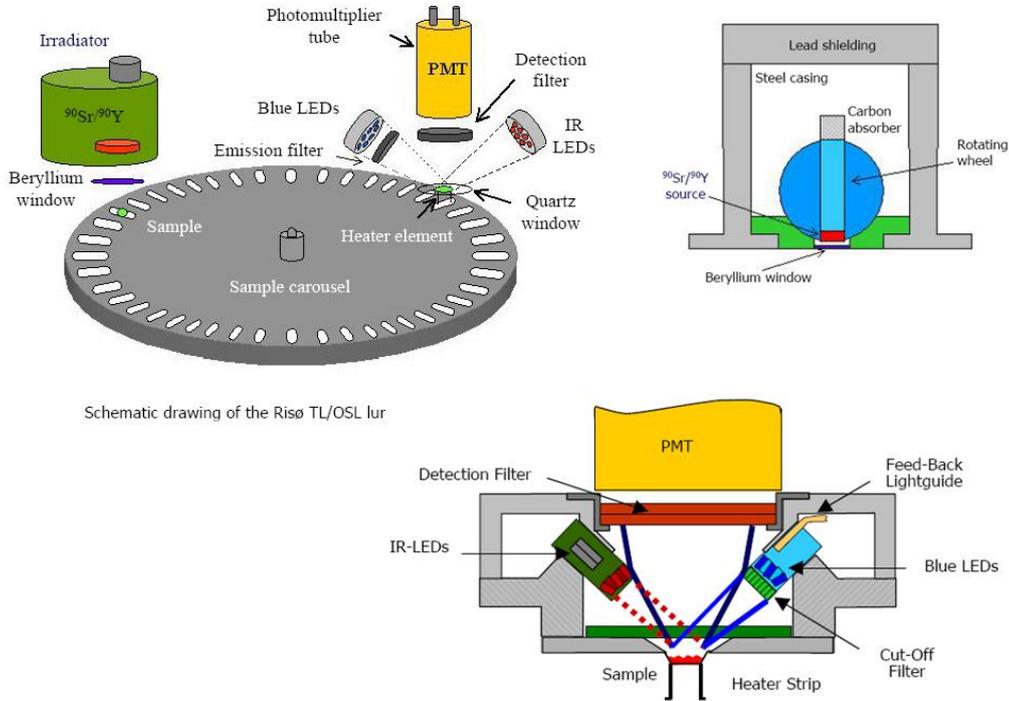


Figure 1. Schematic diagram of Risø TL/OSL Luminescence reader (derived from Risø DTU-National Laboratory).

해안사구(sand dune) 퇴적물의 경우 빛에 노출되는 시간이 길기 때문에 완벽한 시그널 소멸이 잘 이루어져 루미네선스 연대측정에 매우 적합한 시료이다. 반면, 하성 퇴적층이나 매우 급격히 퇴적된 저탁류(turbidite) 또는 붕적 퇴적물(slumping sediment)의 경우 빛에 노출된 시간이 상대적으로 매우 짧기 때문에 부분적 시그널 소멸(partial bleaching)이 일어날 가능성을 갖는다(Kim, 2023).

석영은 장석에 비해 짧은 시간의 노출에도 완벽한 시그널 소멸이 되는 장점을 가지고 있다. 광물들(주로 석영과 장석)에 축적되어 있는 에너지는 빛에 노출될 경우 루미네선스라는 빛의 형태로 방출되는 값을 정량적으로 측정할 것이 등가선량(equivalent dose)이며, 주변 토양에서 측정된 자연방사선량으로부터 연간선량

(dose rate)을 구하게 된다. 연대결과는 측정된 등가선량을 연간선량으로 나누어 얻으며 다음식과 같다.

$$\text{Age}(ka) = \text{equivalent dose}(Gy) / \text{dose rate}(Gy \text{ Kyr}^{-1})$$

KIGAM이 보유하고 있는 Risø TL/OSL DA-20 reader는 TL과 OSL을 동시에 측정할 수 있는 자동화 기계로써 48 디스크(disc)에 시료를 올린 후 자동화시스템으로 동시에 등가선량 측정이 가능하다. 비교조사선량은 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 이 사용된다. 다양한 빛 조사원(light source: blue LED, Infrared LED)이 사용되며 방출된 루미네선스 시그널은 광전자 증배관과 감지 필터(detection filter)를 통해서 측정된다(Fig. 1). Risø TL/OSL DA-20 reader에는 일반적으로

루미네선스 연대측정 상호비교를 위한 국제공동연구 결과 고찰



Figure 2. A sampling site for the luminescence dating intercomparison project : beach sediments on the Skagen Peninsula, Denmark, (Buylaert *et al.*, 2011).



Figure 3. Mixing machine for homogenization of samples and measurement samples distributed to each laboratory (Buylaert *et al.*, 2011).

사용되는 Beta선원($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$)이 장착되어 있다. 이 선원은 일반적으로 1.48GBq(40mCi)의 선원을 조사시킬 수 있으며 최대 2.27MeV의 에너지 조사가 가능하다. 석영이나 장석 시료에 조사시킬 수 있는 선량은 일반적으로 0.1Gy/s이다. Risø TL/OSL DA-20 reader에는 추가적으로 Single grain system을 장착할 수 있다. 이 장치의 최대 사용 목적은 각각의 석영이나 장석 입자 하나 하나로부터 루미네선스를 얻어

서 연대측정을 하는 것으로, 하나의 disc에는 300 μm 직경과 300 μm 깊이의 홈이 100개씩 존재한다. 이 홈에 200 μm 크기의 석영 알갱이를 하나씩 넣은 다음에 532nm 파장의 green laser를 조사시키면 각각의 볼록렌즈를 통해서 focusing된 laser가 각각의 홈에 빛을 조사시키며 이로부터 개별 입자의 루미네선스 시그널을 얻을 수 있다.

Table 1. List of laboratories participating in the luminescence dating intercomparison project (Murray *et al.*, 2015).

| No. | Laboratory name |
|-----|---|
| 1 | Archaeometry Center University of Ioannina, Greece |
| 2 | ArchLab, USTC, China |
| 3 | Babes-bolyai University Faculty of Environmental Science, Romania |
| 4 | CNRS, Bordeaux, France |
| 5 | Department of Physics, Oklahoma State University, USA |
| 6 | Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Germany |
| 7 | Geographisches Institut der Universität zu Köln, Germany |
| 8 | Geological Institute of Hungary, Hungary |
| 9 | Geological Survey of Israel, Israel |
| 10 | Institut für Geologie, Universität Bern, Switzerland |
| 11 | Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan |
| 12 | Key Lab. of Desert and Desertification, Cold and Arid regions: CAS Lanzhou, China |
| 13 | Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), South Korea |
| 14 | Leibniz institut for Applied Geosciences, Hannover, Germany |
| 15 | Netherlands Centre for Luminescence dating, The Netherlands |
| 16 | Sarayköy Nuclear Research and Training Center, Turkey |
| 17 | School of Geographical and Oceanographically Sciences, Nanjing University, China |
| 18 | Scottish Universities Environmental Research Centre, East Kilbride, UK |
| 19 | Shaanxi Normal University (Xi'an), China |
| 20 | Silesian University of Technology, Poland |
| 21 | United States Geological Survey, USA |
| 22 | University of Aberystwyth, UK |
| 23 | University of Adelaide, Australia |
| 24 | University of Illinois at Chicago, USA |
| 25 | University of Illinois, USA |
| 26 | University of London - Royal Holloway, UK |
| 27 | University of Sheffield, UK |
| 28 | University of Washington, USA |
| 29 | Utah State University, USA |
| 30 | Centre de recherche nucléaire d'Alger, Algeria |

3. 시료 채취

OSL용 시료 채취 및 시료 전처리는 Risø 연구소가 주관하였다. 시료는 덴마크 Skagen 반도의 해변 퇴적층에서 채취되었고 각 실험실에 시료 배분을 위하여 다음과 같이 시료 처리를 진행하였다(Fig. 2). 약 25kg의 시료를 검은색 플라스틱 봉지에 담아서 암실에서 Fig. 3의 혼합 기계를 이용하여 모든 시료가 균질화 될 수 있도록 혼합하였다. 그 후 시료 당 약 100g을 각각 검은 봉지에 담아서 프로젝트에 참여한 전세계 루미네선스 연대측정 실험실에 배포하였다. 또한 중액 분리와 HF 처리를 통해서 180-250µm 석영 입자만을 분리하여 700개의

검은 봉지에 분리하여 배포하였다. 전처리 후 180-250µm 크기의 석영만 분리한 시료는 "Provided quartz"로 표기하였고 전처리가 전혀 되지 않은 일반 퇴적물 시료는 "Self-extracted quartz"로 표시하였다.

4. 연구 결과 및 토의

Risø 연구소가 취합하여 발표한 데이터는 다음과 같다. 먼저 루미네선스 시그널은 fast component가 우세하며 매우 낮은 recycling ratio와 recuperation(시그널 회귀) 값을 보인다(Fig. 4). 약 5Gy의 Dose recovery test를 실시한 결과, 실험실 조사선량 대비 회복된 선

루미네선스 연대측정 상호비교를 위한 국제공동연구 결과 고찰

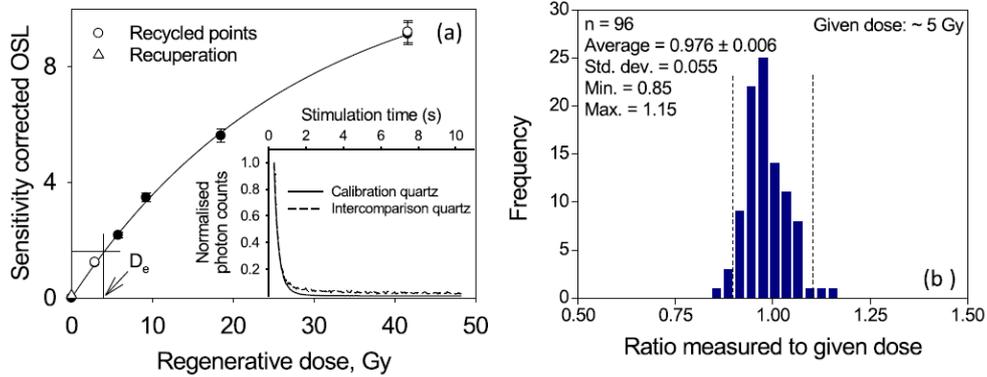


Figure 4. Luminescence characteristics(decay and growth curves) and dose recovery test results of beach sediments on the Skagen Peninsula, Denmark (Murray *et al.*, 2015).

preheat plateau test (063002)

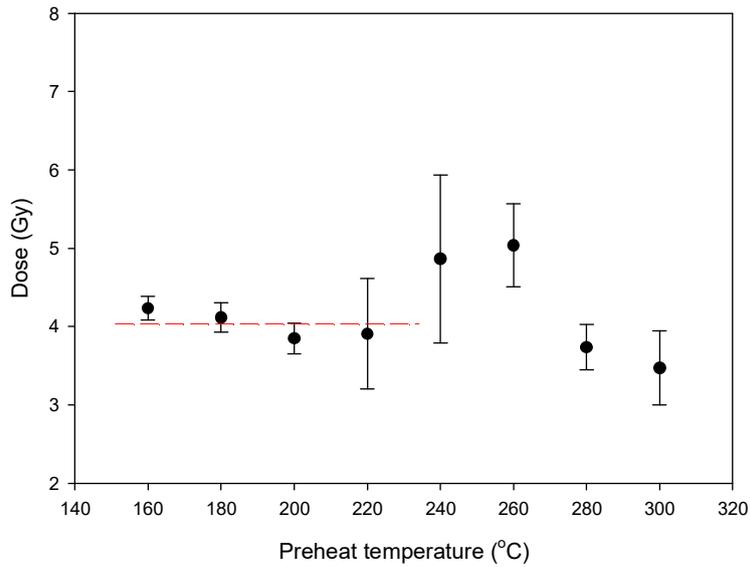


Figure 5. Dose recovery test results using provided quartz (KIGAM).

량값의 비율은 최소 0.85에서 최대 1.15이며 평균값은 0.976 ± 0.006 이다. 이는 선량 회복 시험에서 시료의 약 98%가 회복 선량에 일치되었음을 나타낸다. 따라서 이번 프로젝트에 활용된 해변 퇴적물과 그로부터 분리된 석영 시료는 루

미네선스 연대측정에 매우 적합한 시료임을 의미한다.

Risø 연구소가 취합한 284개의 등가선량 값에 대한 recycling ratio는 최소 0.87에서 최대 1.16이며 평균값은 1.014 ± 0.003 이다. Recuperation

김진철

Table 2. Equivalent dose results (KIGAM) of preheat plateau test using provided quartz. A red number means that the disk was rejected when calculating the average value because it was outside the allowable range.

| Condition | Disc No. | D _e (Gy) | error | N.signal | BG.signal | Recycling ratio (R3/R2) | | IR depletion ratio (R9/R3) | | L _n /T _n |
|---------------|----------|---------------------|-------|----------|-----------|-------------------------|------|----------------------------|------|--------------------------------|
| 160°C preheat | #1 | 1.89 | 0.32 | 1191 | 526 | 0.86 | 0.14 | 0.86 | 0.13 | 2.38 |
| | #3 | 4.79 | 0.61 | 4310 | 643 | 0.85 | 0.1 | 0.98 | 0.11 | 4.47 |
| | #5 | 4.38 | 0.41 | 4001 | 586 | 1.06 | 0.12 | 0.91 | 0.1 | 4.02 |
| | #7 | 4.08 | 0.41 | 4556 | 640 | 1.08 | 0.12 | 0.96 | 0.11 | 3.7 |
| Average | | 4.23 | 0.15 | | | | | | | |
| 180°C | #9 | 4.37 | 0.32 | 19961 | 685 | 0.99 | 0.1 | 0.99 | 0.1 | 4.31 |
| | #11 | 3.91 | 0.31 | 9737 | 593 | 1.02 | 0.11 | 0.96 | 0.1 | 3.5 |
| | #13 | 4.49 | 0.86 | 1462 | 569 | 1.09 | 0.15 | 0.9 | 0.12 | 4.4 |
| | #15 | 3.70 | 0.50 | 1827 | 557 | 1 | 0.15 | 0.89 | 0.13 | 3.54 |
| Average | | 4.12 | 0.19 | | | | | | | |
| 200°C | #17 | 2.39 | 0.38 | 1411 | 547 | 0.84 | 0.15 | 0.89 | 0.15 | 2.52 |
| | #19 | 3.47 | 0.52 | 1278 | 550 | 1.01 | 0.16 | 0.95 | 0.15 | 2.71 |
| | #21 | 4.00 | 0.47 | 2551 | 615 | 1.04 | 0.13 | 0.98 | 0.12 | 3.45 |
| | #23 | 4.08 | 0.40 | 3825 | 568 | 0.98 | 0.11 | 1 | 0.11 | 3.97 |
| Average | | 3.85 | 0.19 | | | | | | | |
| 220°C | #25 | 4.96 | 0.50 | 2663 | 643 | 1.38 | 0.16 | 0.96 | 0.11 | 3.33 |
| | #27 | 3.20 | 0.58 | 1205 | 522 | 0.94 | 0.17 | 1.21 | 0.19 | 3.04 |
| | #29 | 3.20 | 0.35 | 3346 | 596 | 0.92 | 0.11 | 1.07 | 0.12 | 3.06 |
| | #31 | 4.61 | 0.49 | 4228 | 556 | 0.98 | 0.11 | 0.99 | 0.12 | 4.1 |
| Average | | 3.91 | 0.70 | | | | | | | |
| 240°C | #2 | 6.97 | 0.62 | 5893 | 529 | 1.11 | 0.13 | 0.87 | 0.1 | 4.86 |
| | #4 | 4.17 | 0.52 | 3174 | 618 | 1.08 | 0.12 | 1.1 | 0.12 | 2.8 |
| | #6 | 2.09 | 0.81 | 947 | 497 | 0.88 | 0.14 | 0.58 | 0.09 | 1.52 |
| | #8 | 3.45 | 0.36 | 4546 | 657 | 1.08 | 0.12 | 1 | 0.11 | 2.22 |
| Average | | 4.86 | 1.07 | | | | | | | |
| 260°C | #10 | 6.46 | 0.51 | 29484 | 523 | 1.01 | 0.1 | 0.98 | 0.1 | 5.07 |
| | #12 | 4.31 | 0.39 | 5547 | 589 | 0.92 | 0.1 | 0.98 | 0.11 | 3.03 |
| | #14 | 4.14 | 0.75 | 1871 | 543 | 1.15 | 0.14 | 0.95 | 0.11 | 2.66 |
| | #16 | 5.23 | 0.63 | 3722 | 549 | 0.88 | 0.11 | 1.02 | 0.12 | 3.92 |
| Average | | 5.04 | 0.53 | | | | | | | |
| 280°C | #18 | 4.70 | 0.45 | 4104 | 493 | 0.82 | 0.1 | 0.62 | 0.08 | 2.54 |
| | #20 | 2.67 | 0.53 | 1932 | 506 | 0.59 | 0.07 | 1.42 | 0.16 | 2.43 |
| | #22 | 3.45 | 0.27 | 21035 | 706 | 1.09 | 0.11 | 1.01 | 0.1 | 2.45 |
| | #24 | 4.03 | 0.42 | 3314 | 520 | 1.02 | 0.12 | 1.09 | 0.12 | 1.42 |
| Average | | 3.74 | 0.29 | | | | | | | |
| 300°C | #28 | 3.00 | 0.59 | 1064 | 504 | 0.98 | 0.13 | 1.05 | 0.14 | 0.61 |
| | #30 | 6.21 | 1.89 | 834 | 491 | 0.74 | 0.16 | 1.07 | 0.2 | 1.37 |
| | #32 | 3.94 | 0.83 | 855 | 475 | 1.01 | 0.16 | 0.88 | 0.13 | 0.93 |
| Average | | 3.47 | 0.47 | | | | | | | |

의 경우 최소 44mGy에서 최대 365mGy이며 평균값은 55±4mGy이다(Murray *et al.*, 2015). Preheat plateau test에서는 약 220°C까지 plateau가 형성되었으며 220°C까지는 thermal transfer가 거의 발생하지 않았지만 약 250°C 부터 최대 0.2Gy의 thermal transfer가 발생

하였음을 알 수 있다. 종합적으로 등가선량, 연간선량 그리고 절대연대 값은 전체적으로 2시그마 에러(2σ error) 범위 내에 도시되는 양호한 경향성을 보인다. 이는 시료들의 연대측정 재현성이 매우 우수함을 의미한다.

KIGAM에서 측정된 preheat plateau test

루미네선스 연대측정 상호비교를 위한 국제공동연구 결과 고찰

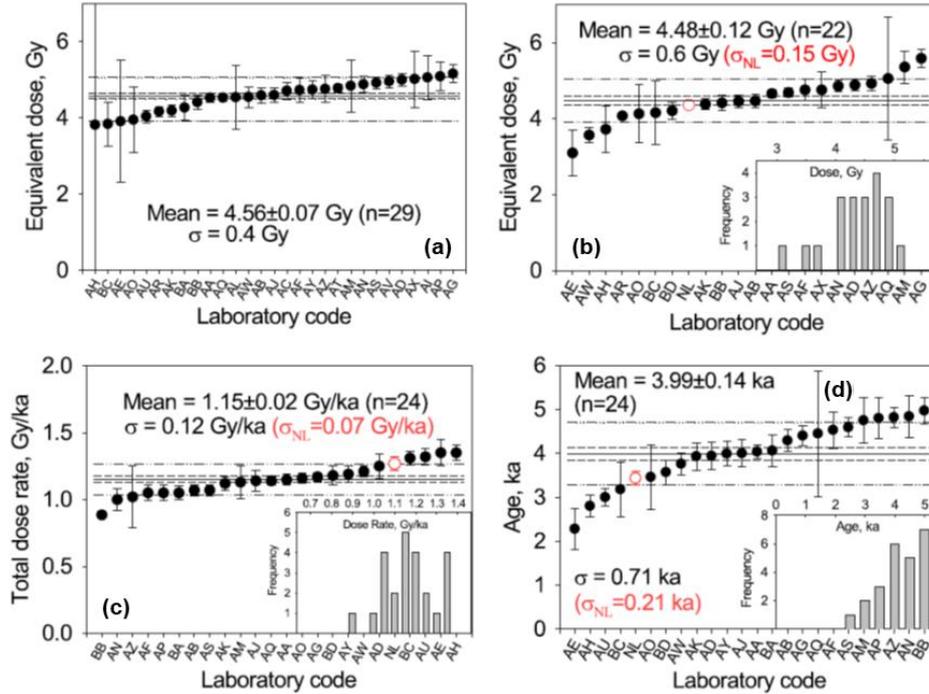


Figure 6. Equivalent dose (a, b), annual dose (c), and absolute age result (d) between provided quartz and self-extracted quartz collected and statistically analyzed by Risø Research Institute (Murray *et al.*, 2015).

결과는 Table 2와 Fig. 5에 나타난다. Preheat plateau test는 160~300°C까지 20°C 간격으로 측정되었으며 각각의 preheat 온도에서는 4개의 disc가 사용되었다. 실험 결과, 160~220°C까지는 평균 4Gy의 등가선량 값을 보이는 반면, 240°C부터 서서히 증가하다가 280°C에서 다시 감소하는 경향성을 보인다. 따라서 plateau가 형성되는 구간은 160~220°C이며 이는 덴마크 Risø 연구소가 취합하여 발표한 preheat plateau test의 plateau 형성 구간과 일치하는 결과이다. 따라서 등가선량 측정을 위해서 220°C의 온도를 선정하였으며 160°C cut-heat 온도를 test dose 측정에 사용하였다.

Risø 연구소가 취합한 등가선량 측정 결과는

두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 전처리가 되지 않은 self-extracted quartz의 경우 최종 평균값은 $4.48 \pm 0.12 \text{ Gy}$ 이다. 반면에 전처리가 끝난 석영 시료(provided quartz)를 이용한 결과 값의 평균 등가선량은 $4.56 \pm 0.07 \text{ Gy}$ 이다. Self-extracted quartz와 provided quartz 간에 약 0.8Gy의 등가선량 차이는 오차범위 내의 수치로 큰 의미를 부여하기는 힘들다. 평균 연간 선량은 $1.05 \pm 0.02 \text{ Gy/ka}$ 이며 이를 바탕으로 최종적으로 계산된 OSL 절대 연대는 $3.99 \pm 0.14 \text{ ka}$ 이다(Fig. 6).

KIGAM이 보유한 전처리 기술을 통하여 얻어진 self-extracted quartz의 등가선량을 측정 한 결과는 $3.58 \pm 0.33 \text{ Gy}$ 이다. 또한, Risø 연구소에서 이미 전처리를 끝낸 provided quartz

김진철

Table 3. Equivalent dose comparison results between self-extracted quartz and provided quartz measured at KIGAM. A red number means that the disk was rejected when calculating the average value because it was outside the allowable range.

| Disc No. | D _e (Gy) | error | N.signal | BG.signal | Recycling ratio (R3/R2) | | IR depletion ratio (R9/R3) | | L _n /T _n |
|------------------------------|---------------------|-------|----------|-----------|-------------------------|------|----------------------------|------|--------------------------------|
| Provided quartz | | | | | | | | | |
| #1 | 3.10 | 0.19 | 2603 | 518 | 1.04 | 0.09 | 0.84 | 0.07 | 2.72 |
| #3 | 4.31 | 0.15 | 6709 | 529 | 0.95 | 0.04 | 0.98 | 0.05 | 3.38 |
| #5 | 2.36 | 0.85 | 639 | 465 | 0.87 | 0.39 | 0.76 | 0.31 | 1.91 |
| #7 | 5.47 | 0.10 | 31398 | 767 | 1.04 | 0.02 | 0.97 | 0.02 | 3.69 |
| #9 | 3.70 | 0.19 | 4153 | 589 | 1.08 | 0.05 | 0.89 | 0.05 | 3.25 |
| #11 | 4.61 | 0.36 | 2628 | 522 | 0.99 | 0.07 | 0.95 | 0.07 | 4.08 |
| #13 | 5.30 | 0.64 | 1583 | 560 | 1.01 | 0.12 | 1.16 | 0.13 | 3.79 |
| #15 | 4.03 | 0.29 | 2817 | 512 | 0.95 | 0.08 | 0.91 | 0.08 | 3.76 |
| #17 | 3.70 | 0.24 | 3063 | 611 | 1.02 | 0.06 | 0.96 | 0.06 | 3.23 |
| #19 | 4.77 | 0.36 | 4014 | 554 | 0.92 | 0.05 | 1 | 0.06 | 4.38 |
| #21 | 5.74 | 0.37 | 4077 | 635 | 1 | 0.08 | 0.95 | 0.08 | 4.79 |
| #23 | 3.31 | 0.58 | 1200 | 536 | 1.05 | 0.22 | 0.8 | 0.13 | 3.27 |
| Average | 4.54 | 0.27 | | | | | | | |
| Self-extracted quartz | | | | | | | | | |
| #25 | 3.23 | 1.10 | 936 | 497 | 1 | 0.16 | 1.01 | 0.13 | 2.99 |
| #27 | 1.44 | 0.04 | 4228 | 641 | 1 | 0.03 | 0.28 | 0.01 | 0.87 |
| #29 | 2.29 | 0.24 | 1682 | 561 | 1.17 | 0.09 | 0.8 | 0.06 | 1.91 |
| #31 | 1.46 | 0.05 | 3073 | 600 | 1.03 | 0.04 | 0.38 | 0.01 | 1.14 |
| #33 | 2.97 | 0.08 | 5904 | 634 | 1.01 | 0.04 | 0.25 | 0.01 | 2.05 |
| #35 | 3.75 | 0.15 | 4663 | 712 | 1.02 | 0.05 | 0.91 | 0.04 | 2.66 |
| #37 | 2.96 | 0.16 | 2647 | 594 | 1.03 | 0.05 | 0.76 | 0.03 | 2.19 |
| #39 | 1.72 | 0.08 | 2303 | 616 | 0.95 | 0.05 | 0.51 | 0.03 | 1.21 |
| #41 | 3.18 | 0.15 | 3627 | 632 | 1.01 | 0.05 | 1.01 | 0.05 | 2.48 |
| #43 | 2.96 | 0.09 | 6153 | 594 | 0.97 | 0.03 | 1.04 | 0.03 | 2.53 |
| #45 | 4.77 | 0.19 | 6158 | 594 | 0.99 | 0.05 | 1.02 | 0.05 | 3.89 |
| #47 | 2.59 | 0.21 | 1644 | 566 | 1.07 | 0.07 | 0.82 | 0.05 | 1.72 |
| Average | 3.58 | 0.33 | | | | | | | |

로부터의 등가선량을 측정된 결과는 4.54±0.27Gy 이다(Table 3). Provided quartz를 통하여 얻어진 등가선량 값은 이번 프로젝트에서 종합된 최종 결과 값인 4.56±0.07Gy와 거의 일치하는 결과를 보인다. 반면, self-extracted quartz로부터 얻어진 등가선량 값은 프로젝트 최종 결과 값인 4.48±0.12Gy와 약 0.9Gy의 차이를 보인다. 이는 KIGAM에서 실시한 전처리 경우 180-212µm 입자 크기의 석영을 사용하였기 때문에 180-250µm 입자크기의 석영을 분리한 Risø 연구소의 시료와 등가선량에서 일부 차이를 보인다고 생각된다. 이러한 차이는 오차범위 내의 값으로 큰 의미를 부여하기는 힘들다. 하지만 연간선량 측정 시 입자 크기에 따른 베타

(β) 선량보정(β attenuation)을 통하여 얻어진 연간선량을 바탕으로 최종 연대 결과를 도출 시 이러한 등가선량의 차이는 일정 부분 감소될 것으로 예상된다.

5. 결론

Risø 연구소가 진행한 국제 공동 연구 프로젝트인 루미네선스 연대측정 상호비교 프로젝트는 등가선량, 연간선량, 그리고 절대연대 결과를 동일 시료를 대상으로 실험실마다 도출하여 실험실 간에 상호 비교와 연대측정의 신뢰도를 평가한 프로젝트이다. 이번 프로젝트에서는 전

루미네선스 연대측정 상호비교를 위한 국제공동연구 결과 고찰

세계 30개 실험실이 참여하였고 KIGAM의 OSL 실험실에서 얻어진 결과 값도 그 중에 포함되어 있다. 실험 결과, 대체적으로 연대결과의 평균 값은 약 13%의 실험실 간 과대산포(over-dispersion) 값을 보인다. 연대 결과의 상대표준편차(RSD: relative standard deviation)는 약 18%이며 이는 예상했던 약 10% 이내 보다는 상대적으로 큰 값으로 생각된다. 이는 등가선량에서 약 13%, 연간선량에서 약 12%의 상대 표준 편차 값으로부터 기인한 것으로 생각된다(Murray *et al.*, 2015). KIGAM에서는 이번 프로젝트에 등가선량 값만을 제공하였다. 등가선량 값의 비교 시 provided quartz를 통하여 얻어진 등가선량 값은 프로젝트 최종 등가선량 값과 거의 일치하는 결과를 보인다. 반면, self-extracted quartz로부터 얻어진 등가선량 값은 프로젝트 최종 결과 값과 약 0.9Gy의 차이를 보이는데 이는 분리된 석영의 입자 크기 차이 등에 기인한다고 생각된다. 이번 국제 공동 연구 프로젝트는 루미네선스 연대측정 관련한 첫 번째 대규모 국제 공동 연구에 해당한다. 이러한 프로젝트를 통하여 국제적으로 루미네선스 연대측정의 신뢰도가 구축되며 더 많이 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로도 다양한 국제 공동 연구 프로젝트가 진행되기를 기대한다.

dating. Han River Archeol 16:81-97.
McKeever, S.W.S., Chen, R., 1997. Luminescence models. Radiat Meas 27:625-661.
Murray, A., Buylaert, J-P., Thiel, C., 2015. A luminescence dating intercomparison based on a Danish beach-ridge sand. Radiat Meas 81:32-38.

2024년 6월 30일 접수
2024년 7월 5일 수정
2024년 7월 10일 승인

참고문헌

- Buylaert, J-P., Murray, A., Thiel, C., 2011. Laboratory intercomparison and calibration, 2011 LED, poster presentation.
- Godfrey-Smith, D.I., Huntley, D.J., Chen, W-H., 1988. Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. Quat Sci Rev 7:373-380.
- Kim J.C., 2023. Archaeological application of optically stimulated luminescence