

베이지안 통계학을 이용한 청동기시대 주거지내 화덕자리들의 광자극발광(OSL) 연대 결정

김명진*, 양혜진†, 홍덕균‡

* (주)네오시스코리아 방사선응용연구센터, † (재)백제문화재연구원 조사2팀, ‡ 강원대학교 물리학과

2011년 2월 16일 접수 / 2011년 4월 6일 1차 수정 / 2011년 4월 7일 채택

이 연구에서는 소골 유적 29호 및 29-1호 주거지 내부에 사용 시기를 달리하여 존재하는 3개의 화덕자리에 대한 광자극발광(OSL) 연대측정을 수행하였다. 연대측정에 앞서 석영 시료의 자연 OSL 신호 관찰 및 절대연년도 평가를 수행한 결과, OSL 신호는 광이온화 단면적이 커 열과 빛에 매우 민감한 fast 성분만으로 이루어졌으며 청동기인들의 일반적인 난방 및 취사 온도인 300°C 이하에서도 완벽히 절대연년 뒤를 알 수 있었다. 각 시료의 고고선량은 단일시료재현법을 적용한 재현성 평가와 플래도우 평가로부터 산출되었고, 이를 연간선량율로 나누어 OSL 연대를 결정하였다. 이후 산출된 OSL 연대의 정밀도를 높이기 위하여 발굴조사를 통해 파악된 화덕자리의 사용 시기와 각 화덕자리의 OSL 연대를 베이지안 통계에 적용한 결과, 개별 화덕자리의 사용 및 폐기 시점에 대한 높은 정밀도를 갖는 OSL 연대가 최종적으로 확정되었다.

중심어 : OSL 연대측정, 베이지안 통계, 화덕자리, 청동기시대

1. 서론

냉광(luminescence)은 무기결정에 흡수된 외부 에너지가 열 또는 빛 등에 의한 자극으로 인해 외부에 빛으로 방출되는 물리적인 현상이며, 일반적으로 에너지 띠 이론(energy band theory)으로 설명되어진다. 이 중 전리성 방사선에 의해 석영의 덫(trap)에 포획된 전자를 녹색 또는 청색의 빛으로 자극하였을 때 방출되는 광자극 냉광을 OSL(optically stimulated luminescence)이라 한다. 특히 자연 석영의 OSL 신호는 주위 환경방사선과 좋은 상관관계를 가지므로 자연선량계로도 폭넓게 이용되어진다[1]. Huntley 등은 이러한 상관관계에 근거하여 퇴적층에서 분리한 석영에서 방출되는 OSL 신호를 이용한 연대측정법을 제안하였으며, 연대는 식 (1)과 같이 시료에서 추출한 석영으로부터 OSL 신호를 측정하여 산출되는 고고선량(paleodose)과 시료 주변의 토양에 포함된 ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K, ⁸⁷Rb 등의 방사성동위원소를 측정하여 산출되는 연간선량율(annual dose rate)의 비로 결정된다[1,2].

$$\text{연대 (yr)} = \frac{\text{고고선량 (Gy)}}{\text{연간선량율 (Gy/yr)}} \quad (1)$$

고고학 연구에 있어서 OSL 연대측정은 토기 및 기와,

화덕자리, 경작층, 구석기 고도양층 등과 같이 석영 등의 무기결정을 다량으로 함유하고 있으며 제작 및 사용, 폐기과정에서 열 또는 빛에 의한 절대연년이 충분히 이루어진 유물 및 유구에 대하여 폭넓게 적용되어져 왔다[3-7]. 특히 OSL 연대측정의 시료는 고고학적인 의미를 지니는 유물과 유구 자체이므로, 이들과 공반 관계에 있는 숯과 나무 등의 유기물 시료에 일반적으로 적용되는 방사성탄소 연대측정보다 고고학 연구에 있어서 매우 가치 있는 연대측정법이다. 그러나 OSL 연대의 오차는 방사성탄소 연대의 오차보다 상대적으로 클 뿐만 아니라, 유물 및 유구의 형식학적 변화에 근거한 고고학 상대편년(relative chronology)의 간격보다도 크기 때문에 고고학 유형의 구분과 판단의 지시자로 직접 사용되기에는 현실적으로 불충분하다. 따라서 OSL 연대의 오차를 줄이기 위해서는 문헌자료와 고고학 발굴조사 등을 통해서 얻어진 선험적 지식을 활용하여 오차를 감소시키는 과정이 요구된다.

(재)백제문화재연구원이 발굴조사한 행정중심복합도시 국제교류지역 생활권 2-1, 2지점(시굴 1-5지점) 문화유적¹⁾에서는 청동기시대 전기에 해당하며 서로 중복된 29호와 29-1호 주거지가 조사되었다. 또한 이들 내부에 존재하는 3개의 화덕자리로부터 29-1호에서 29호로 주거지가 확장 및 증축되었음을 알 수 있었다.

이 연구에서는 소골 유적 29호 및 29-1호 주거지 내부에 존재하는 3개의 화덕자리에서 각각 시료를 채취한 후 OSL 신호를 측정하여 다양한 물리적 특성을 평가하고, 이러한 물리적 특성을 고려하여 각 화덕자리의 정확하고 정밀한

책임저자 : 홍덕균, dghong@kangwon.ac.kr
강원도 춘천시 강원대학교 강원대학교 자연과학대학 물리학과
1) 이하 '소골 유적'이라 한다.

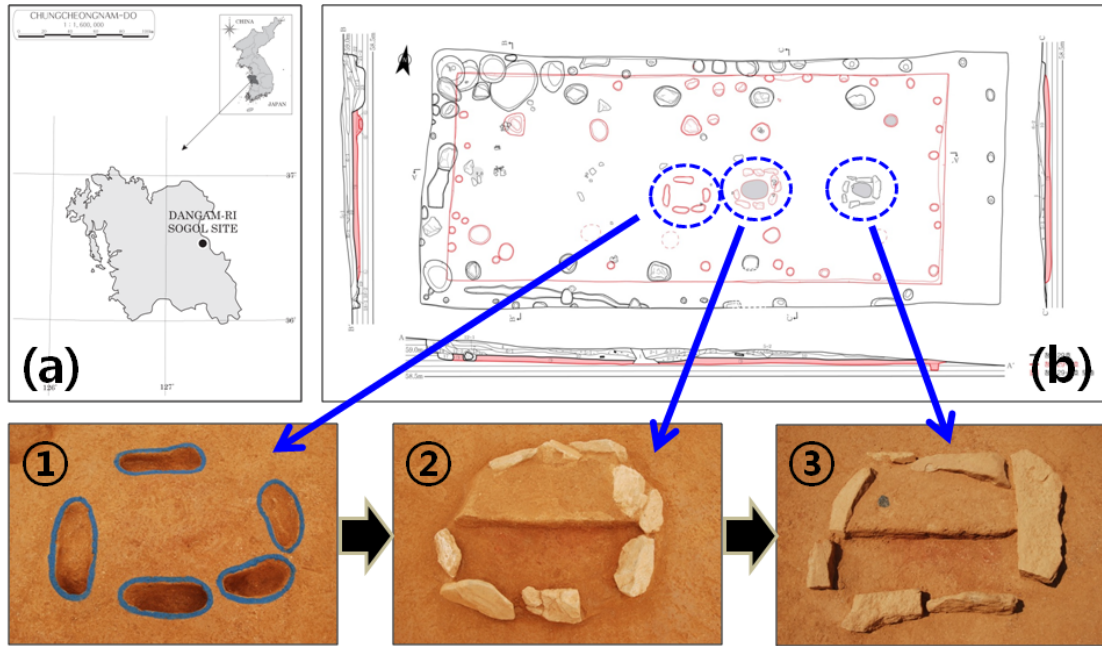


Fig. 1. Geographical location of Sogol cultural site (a) and sampling position from each hearth in No. 29 and 29-1 dwelling sites (b). The hearths were used and scraped in the sequence of type ①, ② and ③.

OSL 연대를 산출하고자 한다. 최종적으로 발굴조사 과정을 통하여 얻어진 층서적 관계와 각 화덕자리의 OSL 연대에 베이저안 통계(Bayesian statistics)를 적용하여 화덕자리의 사용 및 폐기시점 뿐만 아니라 주거지의 증축 및 확장 시기에 대한 절대연대 편년을 수행하고자 한다.

2. 실험 및 연구방법

2.1. 시료

소골 유적은 충남 공주시 장기면 당암리 일대의 낮은 구릉에 위치하며 청동기시대 전기에 해당하는 가락동유형 주거지 14기가 조사되었다. 이 중 해발 63 m의 평탄면에 위치한 29호 주거지는 29-1호 주거지가 증축 및 증복된 것으로 밝혀졌다. 29-1호 주거지에서는 2개의 위석식 화덕자리가 확인되었으며 29호 주거지에서는 1개의 위석식 화덕자리가 각각 확인되었다. 이들 총 3개의 화덕자리는 주거지의 확장 및 증축 등에 따라 시간순서를 갖고 변화했음을 알 수 있었다[8].

Fig. 1은 소골 유적의 지리학적 위치(a)와 29호 및 29-1호 주거지의 세부 도면(b)이다. OSL 연대측정용 시료는 각 주거지의 내부에 존재하는 화덕자리에서 채취되었으며, ①번 화덕자리에서 채취된 시료를 PJY-HB1, ②번 화덕자리는 PJY-HB2, ③번 화덕자리는 PJY-HB3로 각각 명명하였다. 주거지가 29-1호에서 29호로 증축 및 확장되면서 화덕자리의 사용은 시간순으로 ① → ② → ③으로 변화하였다. 고고선량 산출을 위한 시료를 채취할 때는 시료가 빛에 노출되지 않도록 주의해야 한다. 이를 위하여 연대측정을 하려는 화덕자리를 암막으로 덮은 후 시료를 채취하고 검은색 비닐로 감싼 다음 암실로 운반하였다.

고고선량 측정에 필요한 석영은 다음과 같은 화학처리로 얻어졌다[9]. 먼저 채취된 시료를 물로 세척하여 진흙 등을 제거한 뒤 표준 그물망체(standard sieve)를 이용하여 90~250 μm 크기의 입자만으로 선별하였다. 시료 내의 석회나 유기물을 제거하기 위해 10% 염산(HCl)과 과산화수소(H_2O_2)로 시료를 처리한 후, 장석에 의한 오염을 차단하기 위하여 48% 불산(HF)으로 약 한 시간 정도 처리하였다. 장석의 잔존여부를 확인하기 위하여 화학처리를 통하여 분리된 석영 시료 중 일부를 임의로 채취한 후 적외선 여기로 인해 냉광이 방출되지 않음을 통하여 장석에 의한 오염이 없음을 확인하였다[10].

연간선량을 측정을 위한 시료는 화덕자리내 고고선량용 시료 채취지점을 중심으로 약 30 cm 범위의 주변토양을 등방성을 고려하여 채취한 후, 마노유발(agate-mortar)을 이용하여 약 90 μm 크기의 입자상태로 분쇄하여 준비하였다.

2.2. 실험기기

고고선량 산출을 위한 OSL 신호 측정은 (주)네오시스 코리아 방사선응용연구센터에 설치된 Riso TL/OSL reader (Riso TL/OSL-DA-20)를 이용하여 수행하였다[11]. 여기광원으로는 470 ± 20 nm의 파장을 가진 청색 발광 다이오드(Nichia type NSPB-500S)가 사용되었으며 광원의 세기는 $50 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 정도이다. 또한 시료의 장석 오염도를 측정하기 위하여 830 nm의 파장을 가진 적외선 레이저가 사용되었다. 여기광원과 OSL 신호의 분광을 위하여 GG420 필터가 여기광원의 앞에 부착되었으며 OSL 신호는 Hoya U-340 필터와 결합된 광전자 증배관(bialkali EMI 9235QB photomultiplier)으로 검출되었다. 검출기의 전기적 잡음(electric noise) 및 시간에 독립적인 배경신

호(background signal)는 50 counts·s⁻¹ 이하였다. 상온에서 시료에 조사되는 전리성 에너지는 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 베타선원으로부터 제공되며 시료가 받는 흡수선량은 0.092 Gy·s⁻¹이다.

연간선량을 산출을 위한 시료 및 주변 토양의 방사성 동위원소 ²³⁵U, ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K의 농도(mg/kg)는 강원대학교 공동실험실습관에 설치된 고순도 게르마늄 검출기(HPGe gamma detector, p-type, 상대효율 : 40%)를 이용하여 산출하였다.

2.3. 베이지안 통계

고고학 시료에 적용되어지는 다양한 고고과학분석법(archaeometry)은 일반적인 자연과학분석법보다도 높은 정확도와 정밀도를 갖는 결과를 도출하나, 현재 그 자체만으로는 고고학적 연구에 즉각적으로 활용하기가 쉽지 않은 실정이다. 따라서 문헌자료와 고고학 발굴조사 등을 통해서 얻어진 객관적 지식을 적극 활용하여 산출된 결과의 불확도를 합리적으로 감소시키는 과정이 필요하다.

베이지안 통계는 이러한 선험적 지식을 사전확률(prior probability)로 변환한 후, 측정된 결과와 확률 연산을 수행하여 선험적 지식의 타당성을 검증하고 측정 결과의 불확도를 줄이는데 매우 유용한 방법이다[12,13].

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)}{P(B)} \times P(A), \quad P(B) > 0 \quad (2)$$

위 식 (2)에서 P(A)는 사전확률을 의미하며, P(B)는 측정된 결과, P(A | B)는 사후확률(posterior probability)을 의미한다. 사전확률과 사후확률의 일치 및 베이지안 통계 적용의 타당성은 일치지수(agreement index)를 통해 판단되며, 이 값이 60% 이상이면 베이지안 통계의 적용이 유의미함을 뜻한다.

이 연구에서는 OSL 연대의 불확도를 감소시키기 위하여 소골 유적 29호 및 29-1호 주거지에 대한 발굴조사 자료와 각 화덕자리의 OSL 연대에 베이지안 통계를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. OSL 신호의 특성

연대측정을 목적으로 하는 OSL 신호는 일반적으로 여기광원의 세기를 일정하게 유지하며 측정하는 CW-OSL(continuous-wave OSL)이며, 이는 시간이 지남에 따라 지수적으로 급격히 감소된다. CW-OSL 신호는 석영 내에 존재하는 fast, medium, slow 성분의 광이온화 단면적(photoionization cross-section)을 갖는 불순물 덩어리에서 기인하는 각 OSL 신호의 선형조합으로 표현된다[14].

소골 유적에서 얻어진 각 석영 시료로부터 측정된 자연 CW-OSL 신호를 광이온화 단면적의 크기에 따른 선형조합으로 분해한 후, 그 대표적인 예를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 자연 CW-OSL 신호는 광이온화 단면적이 매우 큰 fast 성분과 배경 신호의 조합만

으로 이루어져 있음을 알 수 있었다. 이는 모든 화덕자리 시료가 열과 빛에 매우 민감하며 측정후 약 2초 이내에 OSL 신호가 완전히 방출됨을 의미한다. 따라서 OSL 연대 측정시 시료의 절대연대는 매우 빠르고 완전하게 이루어지리라 판단된다.

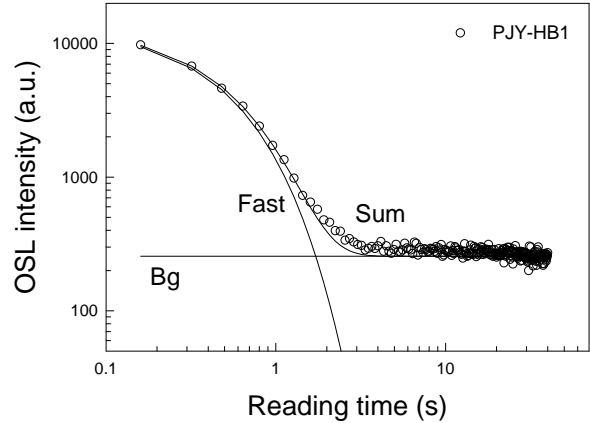


Fig. 2. An example of physical characteristic obtained from the deconvolution of CW-OSL decay curve.

3.2. 절대연년도 평가

청동기시대 주거지내 화덕자리는 주로 난방 및 취사의 목적으로 사용된 것으로 판단되나, 화덕자리에서 놓여진 토기 및 화덕자리 내부토에 어느 정도의 열이 가해졌는지 추정하기란 불가능하다. 음식고고연구회에서는 최근 심발형 토기를 이용한 다양한 음식물 조리 실험을 통해 300℃ 부근의 온도에서부터 많은 음식물 조리가 이루어졌음을 밝혀내었다 [15]. 이는 각 화덕자리에서 채취한 시료의 OSL 신호가 300℃ 이하에서 모두 방출되지 않는다면 부분적인 절대연년으로 인해 정확한 연대를 산출할 수 없음을 의미한다.

이를 확인하기 위하여 각 석영 시료의 일부를 솔라 시뮬레이터(SOL2: Honle/500S, UV technology)를 사용하여 완전히 절대연년 시킨 후 50 Gy의 실험실 방사선을 균일하게 조사하였다. 열에 의한 OSL 신호의 감소를 관찰하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 상온에서부터 450℃ 사이의 각 온도에서 측정에 이용할 시료 디스크(aliquot)를 각각 3개씩 준비하였으며, 열처리는 각 온도에 도달 후 30초 간 유지하는 방식으로 수행하였다. 열처리 후 측정된 각 시료 디스크의 OSL 신호 세기는 시료 디스크 간의 질량차로 인해 규격화(normalization)가 필요하다. 이를 위하여 동일한 양의 시험방사선을 각 시료 디스크에 다시 조사한 후 측정된 OSL 신호의 차이를 이용하여 이를 보정하였다.

열처리로 인한 OSL 신호의 감소는 각각 3개씩의 시료 디스크를 평균하여 산출되었으며, Fig. 3에서 보는 바와 같이 모든 시료에 대하여 240~310℃ 사이에서 OSL 신호가 완전히 소멸되었다. 이는 OSL 연대측정에 적합한 덩어리 온도 사이에만 존재함을 의미한다. 따라서 소골 유적내 화덕자리 시료는 청동기인들의 난방 및 취사 과정에서 높은 열로 인해 절대연년이 완전히 이루어졌음을 알 수 있었다.

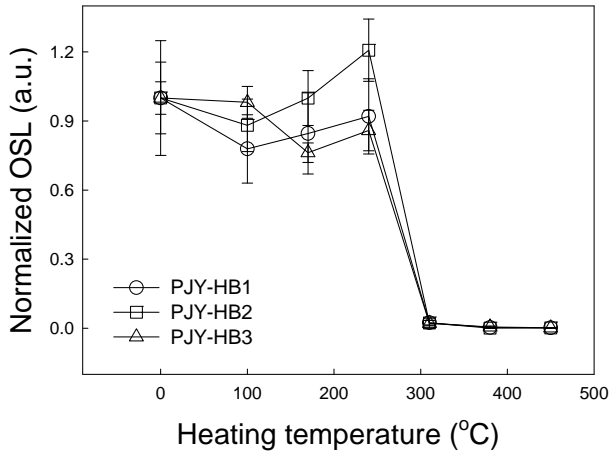


Fig. 3. Determination of the minimum thermal zeroing temperature under the similar thermal condition related to heating and cooking in Bronze age.

3.3. 재현성 평가

현재 매장기간 동안 시료에 축적된 고고선량의 산출은 주로 단일시료재현법(SAR, single aliquot regenerative dose method) [16]을 이용하여 수행되어지고 있으며, 이 경우 석영 시료는 반복적인 실험실 방사선 조사, 열전처리, optical bleaching 등을 경험하게 되어 실제 시료의 고고선량과 다른 선량값이 산출될 위험성이 존재한다. 따라서 고고선량을 산출하기 앞서 임의의 실험실 방사선량을 절대영년 된 시료에 조사한 후 시료로부터 동일한 방사선량이 산출되는가에 대한 평가가 필요하며, 이를 재현성 평가(recovery test)라고 한다.

이 연구에서는 절대영년 된 소골 유적의 각 화덕자리 석영 시료에 다양한 실험실 방사선을 조사한 후 220°C의

열전처리 온도에서 단일시료재현법을 적용하여 흡수선량을 산출하였다(Table 1 참고). Fig. 4에서 보는 바와 같이 임의로 주어진 각 방사선량에 대하여 산출된 흡수선량은 각각 3개의 시료 디스크로부터 얻어진 값을 평균하여 결정되었으며, 25 Gy 이하의 범위에서 서로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 소골 유적 화덕자리 시료의 고고선량 산출을 위해 단일시료재현법을 적용하는 것이 매우 타당하며, 이를 통해 매장기간 동안 시료에 축적된 고고선량을 매우 정확하고 정밀하게 결정할 수 있음을 의미한다.

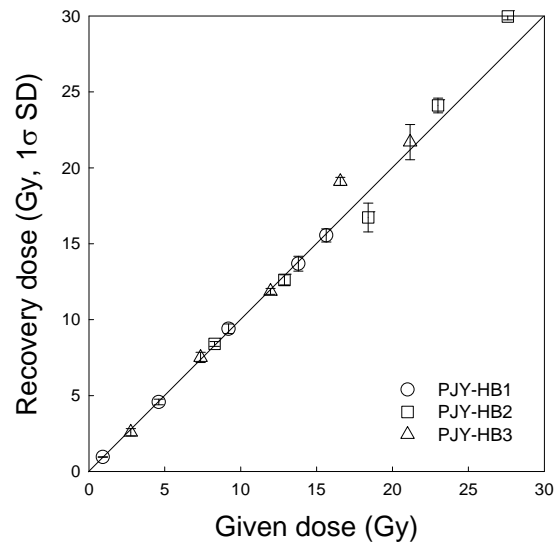


Fig. 4. Dose recovery test against many different doses. Within 25 Gy, all resultant doses evaluated by SAR method were in good agreement with the given doses.

Table 1. Sequences of SAR Method.

Step	Sequence	OSL signal ²
1	Preheating at T [°] C ¹ for 10 s	
2	Blue LED stimulation for 40 s at 125°C	Lx
3	Test dose irradiation, D _T	
4	Cut-heat to 220°C	
5	Blue LED stimulation for 40 s at 125°C	Tx
6	Regenerative dose, D _x and repeat from step 1	

1. For paleodose plateau test, five preheat temperatures, T[°]C, varied from 220°C to 300°C with 20°C intervals were used.
 2. OSL signal was derived from the initial 0.5 s integration which was subtracted using the background signal estimated from the last 2 s of the luminescence decay curve.

3.4. 고고선량 산출

고고선량은 열 또는 빛에 의해 절대영년 된 시료가 매장기간 동안 자기 자신 뿐만 아니라 주변 토양에 존재하는 방사성 핵종 ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K, ⁸⁷Rb 등의 붕괴에너지에 의해 시료에 누적된 흡수선량을 의미하며, 시료의 자연 OSL 신호를 실험실 방사선 조사에 의해 얻어진 OSL 신호와 상호 비교하여 구할 수 있다. 이 연구에서는 단일시료

재현법을 사용하여 각 화덕자리 시료의 고고선량을 산출하였다.

소골 유적에서 채취된 화덕자리 석영 시료의 고고선량 산출에 적용된 단일시료재현법은 Table 1과 같으며, 고고선량의 열전처리 안정성을 동시에 평가하기 위하여 플래토우 평가(plateau test)를 함께 수행하였다.

Fig. 5는 소골 유적에서 채취한 화덕자리 석영 시료로

부터 고고선량을 산출하기 위해 플래토우 평가를 수행한 결과이다. 각각의 시료에 대해 특정 열전처리 온도로부터 고고선량을 산출하기 위하여 3개씩 시료디스크를 준비한 후, 열전처리 온도를 220℃부터 300℃까지 20℃씩 증가시키면서 고고선량을 산출하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 각 시료의 고고선량은 열전처리 온도와 상관없이 플래토우를 이루었으며 이는 고고선량이 열전처리에 대하여 매우 안정적임을 의미한다.

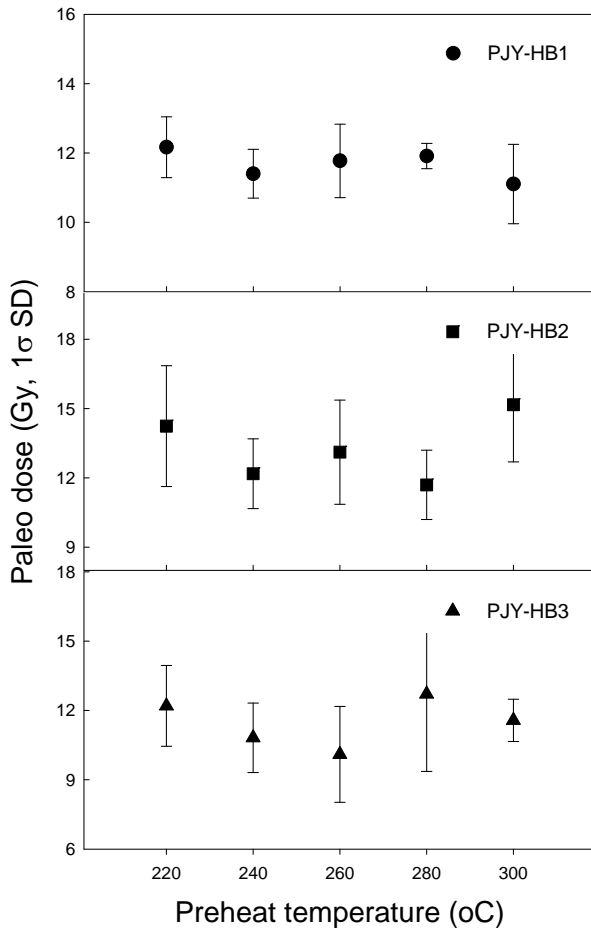


Fig. 5. Paleodose plateau test for verifying thermal stability within 220°C and 300°C preheat temperature.

최종적으로 고고선량은 플래토우 평가에 사용된 총 15개 내외의 시료 디스크로부터 얻어진 선량들을 평균하여 얻어졌으며 이를 Table 2에 각각 정리하였다. 고고선량의 상대오차는 모두 3% 이하로 매우 낮았기 때문에 각 화덕자리 시료는 절대연년이 매우 잘 이루어졌으며, 산출된 고고선량도 매우 정확하고 정밀하다고 판단된다.

3.5. 연간선량을 산출

OSL 연대측정에서 연간선량은 고고선량과 함께 연대를 결정하기 위한 필수 요소이다. 일반적으로 시료채취 장소에서 토양을 채취한 후, 시료와 토양 각각의 방사성 핵종 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 등의 농도(mg/kg)를 구하고 변환인자(conversion factor)를 사용하여 연간선량을 계산한다[17].

이 연구에서는 화덕자리 시료를 채취한 지점을 중심으로 30 cm 이내에서 등방성(homogeneity)을 고려하여 토양 시료를 채취하고(Fig. 1 참고), 시료와 주변 토양의 방사성 동위원소의 농도를 감마선 분광분석을 통해 산출하였다. Table 2에 정리된 전체 연간선량은 변환인자를 사용하여 계산된 베타, 감마 연간선량을 값과 우주선(cosmic ray)에 의한 연간선량을 값을 합산한 것이다. 실험실에서 석영을 불산으로 한 시간 정도 처리하여 표층을 약 10 μm 정도 에칭시켰기 때문에 알파입자에 의한 연간선량은 전체 연간선량에서 고려하지 않았다. 우주선에 의한 연간선량은 0.15 mGy·yr⁻¹로 추정하였으며[18], 최종적인 연간선량은 시료의 수분 함량에 대한 보정과 불산의 에칭으로 손실된 선량을 고려하여 결정되었다 [19].

Table 2. OSL Dating Results of Three Hearths in No. 29 and 29-1 Dwelling Sites at Sogol Cultural Site.

Sample	Grain size (μm)	Effective aliquot	Paleodose (Gy)	Gamma dose rate (mGy/yr)	Beta dose rate (mGy/yr)	Cosmic dose rate (mGy/yr)	Total dose rate corrected ¹ (mGy/yr)	OSL age (yrs, 1σ SE)	Corrected age using Bayesian statistics (yrs, 1σ SE)
PJY-HB1 (1st hearth)	90-250	15/16	11.83 ± 0.18	1.07 ± 0.02	2.97 ± 0.08	0.15 ± 0.01	3.56 ± 0.07	1,310 ± 80 BC	1,340 ± 60 BC
PJY-HB2 (2nd hearth)	90-250	12/16	12.29 ± 0.30	1.12 ± 0.03	3.11 ± 0.08	0.15 ± 0.01	3.72 ± 0.07	1,290 ± 100 BC	1,300 ± 60 BC
PJY-HB3 (3rd hearth)	90-250	13/16	10.82 ± 0.29	1.00 ± 0.02	2.66 ± 0.07	0.15 ± 0.01	3.25 ± 0.06	1,320 ± 110 BC	1,260 ± 70 BC

1. Total dose rate is corrected for water content using the formula of Zimmerman and takes account for beta attenuation through the grains by a factor of 0.9. Cosmic ray contribution was considered as 0.15 mGy/yr.

3.6. OSL 연대결정

소골 유적 29호 및 29-1호 주거지내 화덕자리 시료의 OSL 연대는 단일시료재현법과 플래도우 평가를 통해 산출된 고고선량과 감마선 분광분석을 통해 산출된 연간선량을 식 (1)에 대입하여 결정하였으며, 오차는 1σ 표준 오차로 표현하였다. 이 연구에서 결정된 소골 유적 화덕자리 시료의 OSL 연대를 Table 2에 정리하였다.

3.7. 베이저안 연대 산출

청동기시대 이후의 유물 및 유구 등의 고고학 시료에 대한 OSL 연대는 일반적으로 5% 미만의 매우 낮은 상대 오차를 가짐에도 불구하고 형식학적 변화에 근거한 고고학 상대편년의 시기 구분보다도 오차의 폭이 크기 때문에 고고학 유형의 구분과 판단의 지시자로 직접 사용하기에는 현실적으로 불충분하다.

이 연구에서는 소골 유적 29호 및 29-1호 주거지 내부에 존재하는 3개의 화덕자리에서 각각 OSL 연대측정용 시료를 채취하고 다양한 물리적 특성을 평가한 후, 이를 바탕으로 각 화덕자리의 OSL 연대를 산출하였다. 특히 (재)백제문화재연구원에 의해 정밀 발굴조사가 수행된 소골 유적은 Fig. 1에서 보듯이 29호 및 29-1호 주거지 내부에 3개의 화덕자리가 존재하며, 이는 주거지의 증축 및 확장의 결과임이 밝혀졌다. 또한 이러한 과정에서 화덕자리의 사용 및 폐기는 ① → ② → ③의 시간 순으로 변화하였음도 추위 연구를 통하여 확인되었다.

Fig. 6은 소골 유적의 발굴조사를 통하여 알려진 화덕자리의 사용 및 폐기 순서와 산출된 각 화덕자리의 OSL 연대를 베이저안 통계에 적용한 결과이다. 이 그림에서 각 연대의 흰 부분은 기존의 OSL 연대 범위이며 검게 채워진 부분은 베이저안 통계를 통하여 보완 및 향상된 연대 범위를 의미한다. 또한 일치지수 $A=120.4\%$ 로부터 이러한 과정이 매우 타당하게 수행되었음을 알 수 있었다.

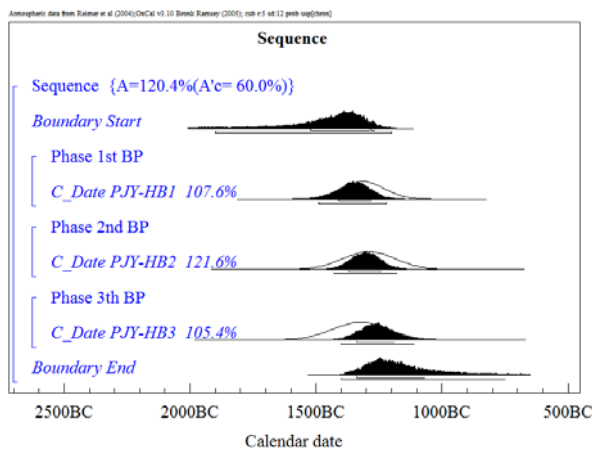


Fig. 6. Improvement of OSL ages by using Bayesian statistics based on the archaeological sequence information.

따라서 새롭게 산출된 OSL 연대는 개별 화덕자리의 사용 및 폐기 시점에 대한 높은 정밀도를 제공할 뿐만 아니라 이로부터 청동기인들이 29호 주거지와 29-1호 주거지 각각에 정주했던 기간, 증축 및 확장을 통해 29-1호 주거지로 29호 주거지로 이주한 시점 등에 대한 정확한 추정이 가능토록 하였다. 최종적으로 베이저안 통계를 적용하여 결정된 소골 유적 29호 및 29-1호 주거지내 화덕자리의 절대연대를 Table 2에 추가 하였다.

4. 결론

소골 유적에서 발굴조사된 29호 및 29-1호 청동기시대 주거지는 내부에 사용 시기를 달리하는 3개의 화덕자리가 존재 하였으며, 이는 주거지의 증축 및 확장의 결과임이 밝혀졌다.

이 연구에서는 OSL 연대측정을 목적으로 각 화덕자리에서 시료를 채취한 후, 화학처리를 통하여 석영 시료만을 추출하였다. 연대측정에 앞서 석영 시료의 자연 OSL 신호 관찰 및 절대연년도 평가를 수행한 결과, OSL 신호는 광이온화 단면적이 커 열과 빛에 매우 민감한 fast 성분만으로 이루어졌으며 청동기인들의 일반적인 난방 및 취사 온도인 300℃ 이하에서도 완벽히 절대연년 됨을 알 수 있었다. 각 시료의 고고선량은 재현성 평가과 플래도우 평가를 통해 타당성이 검증된 단일시료재현법을 적용하여 산출하였고, 이를 연간선량율로 나누어 OSL 연대를 결정하였다. 이후 산출된 OSL 연대의 정밀도를 높이기 위하여 발굴조사를 통해 파악된 화덕자리의 사용 시기와 각 화덕자리의 OSL 연대를 베이저안 통계에 적용한 결과, 개별 화덕자리의 사용 및 폐기 시점에 대한 높은 정밀도를 갖는 OSL 연대가 최종적으로 확정되었다.

이 연구에서와 같이 발굴조사를 통하여 밝혀진 고고학적 지식과 OSL 연대측정 결과 및 각종 고고과학적 분석 결과를 베이저안 통계에 적용하여 산출되는 정밀도 높은 결과들은 앞으로 고고학과 자연과학의 학제간 연구의 효율성을 증대시키리라 예상된다.

감사의 글

본 논문은 (재)백제문화재연구원이 수행한 ‘행정중심복합도시 국제교류지역 생활권 2-1, 2지점(시굴 1-5지점) 발굴조사(허가번호: 제2006-694호)’의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Aitken MJ. An Introduction to Optical dating. New York; Oxford University Press, Inc., 1998.
2. Huntley DJ, Godfrey-Simth DI, Thewalt MLW. Optical dating of sediments. Nature 1985;313: 105-107.
3. 김명진, 홍덕균. 한국 중부지역 청동기시대 전기 유적의 광 여기 루미네선스를 이용한 연대측정. 보존과학

- 회지 2004;16:5-14.
4. 김명진, 홍덕균. Pre-dose effect를 이용한 고고학 시료의 연대측정. *Analytical Science & Technology* 2005; 18:329-337.
 5. 김명진. 단일입자 재현법을 이용한 고고학 시료의 광여기 루미네선스 연대측정. *錦江考古* 2005;2:153-170.
 6. 김명진. 극세립 석영(63-125 μ m)을 이용한 천안 청당동 구석기 유적 고토양층의 OSL 연대측정. *錦江考古* 2006; 3:189-204.
 7. 김명진, 송기웅, 이찬희, 장성윤, Isao Takashima, 홍덕균. 감쇄기법(subtraction method)을 이용한 백제 무령왕릉 관련 전(塹)의 연대결정. *Analytical Science & Technology* 2007;20 508-515.
 8. 양혜진, 이정호. 공주 당암리 소골 유적. 제22회 호서고고학회 학술대회 2010.
 9. Fleming SJ. Thermoluminescence dating: refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry* 1970;12:133-147.
 10. Spooner NA, Aitken MA, Smith BW, Franks M, McElroy C. Archaeological dating by infrared stimulated luminescence using a diode array. *Radiat. Prot. Dosim.* 1990;34:83-86.
 11. Botter-Jenson L, Bulur E, Duller GAT, Murray AS. Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. *Radiat. Meas.* 2003;37:535-541.
 12. 김용대, 박홍선, 신기일, 신민웅, 이상은. 베이저안 통계학. 제1판. 서울; 자유아카데미, 2000.
 13. 김명진, 이성준, 박순발, 홍덕균. 베이저안 통계학(Bayesian statistics)을 이용한 한국 청동기시대 전기 可樂洞 類型의 연대 고찰. *한국상고사학보* 2005;47: 37-57.
 14. Bailey RM, Smith BW, Rhodes EJ. Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL. *Radiat. Meas.* 1997;27:123-135.
 15. 음식고고연구회. 취사실험의 고고학. 서울; 서경문화사, 2011.
 16. Murray AS, Wintle AG. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.* 2003;37: 377-381.
 17. Nambi KSV, Aitken MJ. Annual dose conversion factors for TL and ESR dating. *Archaeometry* 1986; 28:202-205.
 18. Prescott JR, Stephan LG. Contribution of cosmic radiation to environmental dose. *PACT* 1982;8: 205-213.
 19. Zimmerman J. The radiation-induced increase of thermoluminescence sensitivity of fired quartz. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1971;4:3277-3291.

OSL Age Determination of the Hearths in a Bronze Age Dwelling Site by using Bayesian Statistics

Myung-Jin Kim*, Hye-Jin Yang[†], and Duk-Geun Hong[‡]

*Center for Applied Radiation Research, Neosiskorea Co. Ltd.,

[†]Excavation Research Team 2, Baekje Cultural Properties Research Institute,

[‡]Department of Physics, Kangwon National University

Abstract - OSL dating for three hearths having the sequence of use and discard in No. 29 and 29-1 dwelling sites at Sogol cultural site was carried out. Resulting from the deconvolution of natural CW-OSL decay curve and thermal zeroing test, it was turned out that OSL signal was entirely composed of the heat- and light-sensitive fast component with high photoionization cross-section and all quartz OSL signals were thermally bleached under 300°C which is the minimum temperature related to heating and cooking in Bronze age. After dose recovery test and plateau test, paleodose of each hearth sample was evaluated by using SAR method, and OSL age was determined from the ratio of paleodose to annual dose rate. For the purpose of the precision improvement of OSL age, Bayesian statistics was applied to each hearth's age and the archaeological sequence information. Finally, it could be concluded to the accurate use period of each hearth from the resultant OSL ages.

Keywords : OSL dating, Bayesian statistics, hearth, Bronze age