

Evaluation of the formation and occupation of Gosan-ri archaeological site in Jeju Island using OSL dating

Myung-Jin Kim[★]

Radiation Research Institute, Neosiskorea Co., Ltd. Daejeon 34122, Korea

(Received September 17, 2016; Revised November 23, 2016; Accepted November 23, 2016)

OSL 연대측정을 통한 제주 고산리 유적의 형성과 점유시기 결정

김 명 진[★]

(주)네오시스코리아 방사선기술연구소

(2016. 9. 17. 접수, 2016. 11. 23. 수정, 2016. 11. 23. 승인)

Abstract: Gosan-ri site is known as the early Neolithic cultural heritage, in which an archaic plainware, called as the Gosan-ri-type pottery, was excavated regarding as the first pottery manufactured in Korea. In this study, OSL dating was carried out to five soil layer samples collected in stratigraphic cross-section for evaluating the formation and occupation of the Gosan-ri site. Paleodose of each soil sample was calculated using the single aliquot regenerative dose (SAR) method with preheat of 220 °C and finally determined using maximum age model, considering its deposition process. The OSL age was determined from the ratio of paleodose to annual dose rate. From the resultant OSL ages and the related 14C dates, it was concluded that the Gosan-ri site was formed after 9,000 BC and a variety of cultural feature including the Gosan-ri-type pottery were occupied ranging from the early Neolithic to the middle of 4,000 BC. Finally, the Gosan-ri site was discarded in the middle of 4,000 BC and has been arrived at present through natural deposits.

요 약: 고산리 유적은 우리나라 최초 토기로 알려진 고산리식 토기가 출토된 초기 신석기시대 유적이다. 이 연구에서는 고산리 유적의 형성 및 점유에 대한 절대연대 편년을 위하여 유적 내 표준 퇴적층에서 채취된 시료를 대상으로 OSL 연대측정을 수행하였다. 각 퇴적층의 고고선량은 220 °C 열전처리 온도의 단일시료재현법을 적용하여 산출되었으며, 최종적으로 유적의 퇴적환경을 고려하여 maximum age model을 적용하여 결정하였다. 산출된 고고선량을 연간선량율로 나누어 고산리 유적 퇴적층의 OSL 연대를 결정하였다. 각 퇴적층의 OSL 연대와 14C 연대를 종합한 결과, 고산리 유적은 신석기인들에 의해 기원전 9천년 이후에 형성된 이후 고산리식 토기를 포함하는 신석기시대 초기 유적에서부터 다양한 시기의 다양한 유구가 존재해 오다가 기원전 4천년 중반에 폐기되어 현재에 이르렀다고 추론된다.

Key words: Gosan-ri site, OSL dating, maximum age model, early Neolithic

[★] Corresponding author

Phone : +82-(0)42-489-6541 Fax : +82-(0)42-489-6534

E-mail : mjkim@neosiskorea.com

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

제주 고산리 유적(濟州 高山里 遺蹟, 사적412호)은 1987년 타계석창과 굽개 등이 고산리 일대에서 발견되면서 처음 알려지게 되었으며, 이후 여러 번의 시·발굴조사를 통해 우리나라 신석기시대 초창기 정주취락(定住聚落)의 성격과 특징을 보여주는 국내 유일의 유적으로 평가받고 있다. 특히 고산리 유적에서 출토된 원시무문토기(原始無文土器)는 ‘고산리식 토기’로 불리며 우리나라에서 제작된 최초의 토기로 알려져 있다.¹ 고산리 유적의 이러한 학술적 중요성에도 불구하고 고산리 유적의 형성 및 점유에 대한 절대연대측정과 이를 통한 편년 설정은 현재까지 제대로 시도된 적이 없다.

고산리 유적은 화산활동으로 인해 형성된 응회암 기반층 상부에 쌓인 여러 겹의 퇴적층 사이에 위치하고 있다. 따라서 고산리 유적의 형성 및 점유, 폐기에 대한 절대연대 편년을 위해서는 이들 퇴적층의 퇴적시점 정확히 추정할 필요가 있다. 현재 고고학 및 지질학, 지리학 연구에 사용되는 다양한 절대연대측정법 중 광자극 냉광(optically stimulated luminescence, OSL)을 이용한 연대측정법은 퇴적층 자체를 연대측정 하여 퇴적시점을 결정 할 수 있는 유일한 방법이다.² OSL 연대측정에서 연대는 식 (1)과 같이 퇴적층 시료에서 추출된 석영의 OSL 신호로부터 산출되는 흡수선량(equivalent dose) 값들을 종합하여 결정되는 고고선량(paleodose)과 시료와 시료 주변토양에 포함된 ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K, ⁸⁷Rb 등의 방사성동위원소를 각각 측정하여 산출되는 베타선량율과 감마선량율, 그리고 우주선량율의 합인 연간선량율(annual dose rate)의 비로 결정된다.

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

이 연구에서는 고산리 유적의 형성 및 점유에 대한 절대연대 편년을 위하여 유적 내 표준 퇴적층에서 채취된 시료를 대상으로 OSL 연대측정을 수행하였다. 이를 위해 퇴적층 시료에서 추출된 석영의 OSL 신호에 대한 물리적 특성을 우선 평가하였다. 이후 퇴적층의 고고선량을 산출하고 이를 연간선량율로 나누어 각 퇴적층의 OSL 연대를 결정하였다. 최종적으로 고산리 유적 내 유구에서 채취된 목탄의 14C 연대측정치와 결합하여 고산리 유적의 형성 및 점유시점을 종합적으로 추론하였다.

2. 시료 및 실험기기

2.1. 시료 채취

고산리 유적은 제주특별자치도 북제주군 한경면 고산리 일대에 위치하고 있으며, ‘자구내’ 하천과 해안선을 따라 남북 1.2 km, 동서 300 m의 규모로 장방형을 이루며 형성되어 있다. 현재 고산리 유적 주변으로 신석기시대부터 철기시대에 이르는 다양한 유적들이 존재하고 있음이 확인되었다. 고산리 유적에 대한 2012년도 발굴조사에서는 고산리 3625번지 외 8필지에 대한 조사를 통하여 신석기시대의 다양한 유구 및 유물이 출토되었을 뿐만 아니라 유적의 표준 퇴적단면도 정립되었다.¹ 이 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 표준 퇴적단면 내 각 퇴적층에서 OSL 연대측정을 위해 총 5 개의 퇴적층 시료를 채취하였다. 이를 세부적으로 보면 JJM-KS1Re 시료를 채취한 층은 유적 형성 이전의 화산활동으로 인해 형성된 화산쇄설물층(5층), JJM-KS2Re 시료는 유적의 형성과 관련된 암갈색사질점토층(4층), JJM-KS3Re와 KS4Re 시료는 유적의 점유 및 생활과 관련된 문화층(3층), JJM-KS5Re 시료는 유적의 폐기 이후에 형성된 흑색사질점토층(2층)에 각각 해당된다.

OSL 연대측정을 위한 시료 채취 시 가장 주의해야 할 사항은 시료가 빛에 노출되지 않도록 하는 것이다. 이를 위해 연대측정을 하려는 퇴적층에 스테인레스스틸 파이프를 박아 시료를 채취한 후 시료가 외부의 빛에 노출되지 않도록 파이프의 양끝을 검은색 비닐로 밀봉하여 암실로 운반하였다. 이후 파이프의 중앙을 절단한 후 빛에 노출되지 않은 부분을 고고선량 측정용 시료로 선택하고 나머지 부분은 수분함량 측정을 위해 사용하였다. 이와 함께 연간선량율 측정을 위해 시료채취 지점에서 약 30 cm 범위 내의 주변토양을 균질하게 채취하였다.

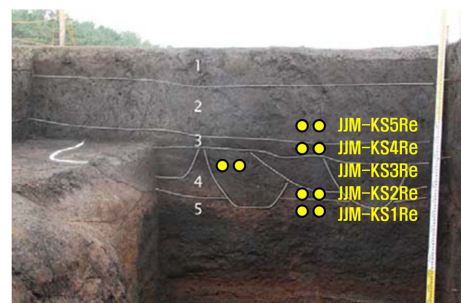


Fig. 1. Photograph of stratigraphic cross-section and sampling position in the Gosan-ri archaeological site, Jeju Island.

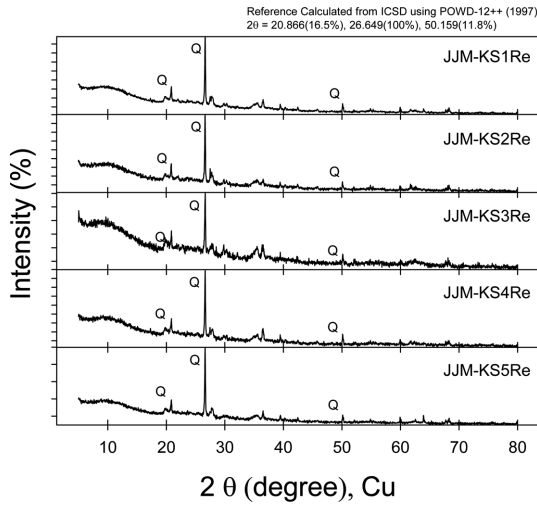


Fig. 2. XRD analyses of the soil samples collected in the Gosan-ri site.

2.2. 전처리

고산리 유적의 퇴적층은 사질응회암질 역암을 모재로 하며 구릉지 및 급경사지에 분포하고 있는 화산회토이다. 채취된 표준단면 퇴적층 시료 내에 석영의 존재 여부를 확인하기 위해 각 시료의 일부를 강원대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 XRD 분석(X-ray diffraction analysis)을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 일반적으로 XRD 신호 중 석영 표준물질의 주요 2θ 각도는 20.866° (16.5%), 26.649° (100%), 50.159° (11.8%)이다. 이 연구에서 채취한 모든 퇴적층 시료에서 석영 표준물질과 동일한 피크가 관찰되었다. 이는 고산리 유적에서 채취한 모든 퇴적층 시료 내에 석영이 존재하며, 이를 이용한 OSL 연대측정이 가능함을 의미한다.

고고선량 측정에 필요한 석영은 다음과 같은 화학처리로 얻어졌다.³ 먼저 시료를 물로 세척하여 진흙 등을 제거한 뒤 표준 그물망체(standard sieve)를 이용하여 90~250 μm 크기의 입자만을 선별하였다. 이 중 석회나 유기물의 제거를 위해 10% 염산(HCl)과 과산화수소(H₂O₂)로 처리한 후, 장석에 의한 오염을 차단하기 위하여 48% 불산(HF)으로 한 시간 정도 처리하였다. 화학처리를 통하여 얻어진 석영 시료 안에 장석의 잔존여부를 확인하고자 미량을 임의로 채취하여 적외선을 조사한 후 냉광이 검출되지 않음을 통하여 장석의 오염이 없음을 확인하였다.⁴

또한 연간선량을 측정을 위한 주변토양 시료는 감마선 분광분석을 위해 충분히 건조한 다음 마노 유발

(agate-mortar)을 이용하여 90 μm 정도의 입자 상태로 분쇄하여 준비하였다.

2.3. 실험기기

고고선량 산출을 위한 냉광 측정은 Riso TL/OSL reader (Riso TL/OSL-DA-20)를 이용하여 수행하였다.⁵ 여기광원으로는 470±20 nm의 파장을 가진 청색 발광 다이오드(Nichia type NSPB-500S)가 사용되었으며 광원의 세기는 50 mW/cm² 정도이다. 또한 시료의 장식 오염도를 측정하기 위하여 830 nm의 파장을 가진 적외선 레이저가 사용되었다. 여기광원과 냉광의 분광을 위하여 GG420 필터가 여기광원의 앞에 부착되었으며 냉광은 Hoya U-340 필터와 결합된 광전자 증배관(EMI 9635QA photomultiplier)으로 검출되었다. 검출기의 전기적 잡음(electric noise) 및 시간에 독립적인 배경 신호(background signal)는 50 counts/s 이하였다. 상온에서 시료에 조사되는 전리성 에너지는 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 베타선원으로 부터 제공되며 시료가 받는 흡수선량은 0.09 Gy/s 이다.

연간선량을 산출을 위한 감마선 분광분석은 강원대학교 공동실험실습관에 설치된 고순도 게르마늄 검출기(HPGe gamma detector, p-type, 상대효율 : 40%)를 이용하여 수행되었다.

3. 결 과

3.1. 냉광 신호의 특성

OSL 연대측정 시 흡수선량 측정 조건을 정확히 설정하기 위해서는 냉광 신호의 물리적 특성을 먼저 파악해야만 한다. 일반적으로 열자극 냉광(thermoluminescence, TL) 신호는 피크의 형태를 갖으며 특정한 온도에서 나타나는 TL 피크의 위치와 모양은 석영 내 불순물 덩의 종류와 물리적 특성에 관계된다.² 또한 OSL 신호는 불순물 덩의 광이온화 단면적(photoionization cross-section)의 크기에 따라 fast, medium, slow 신호 성분의 선형조합으로 해석된다.⁶ 특히 TR-OSL (time resolved OSL) 신호로부터 OSL 신호의 냉광수명(lifetime)을 산출할 수 있다.⁷ 이들 TL/OSL 신호를 통해 시료의 열전처리(preheat) 온도 및 절대연년 등에 대한 정보를 사전에 얻을 수 있다.

고산리 유적 표준단면 내 퇴적층 시료에서 추출한 석영 시료를 대상으로 TL/OSL 신호 특성을 조사하였으며, 그 중 JJM-KS3Re 시료의 특성을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 자연 TL 신호와 10 Gy의 베타선이

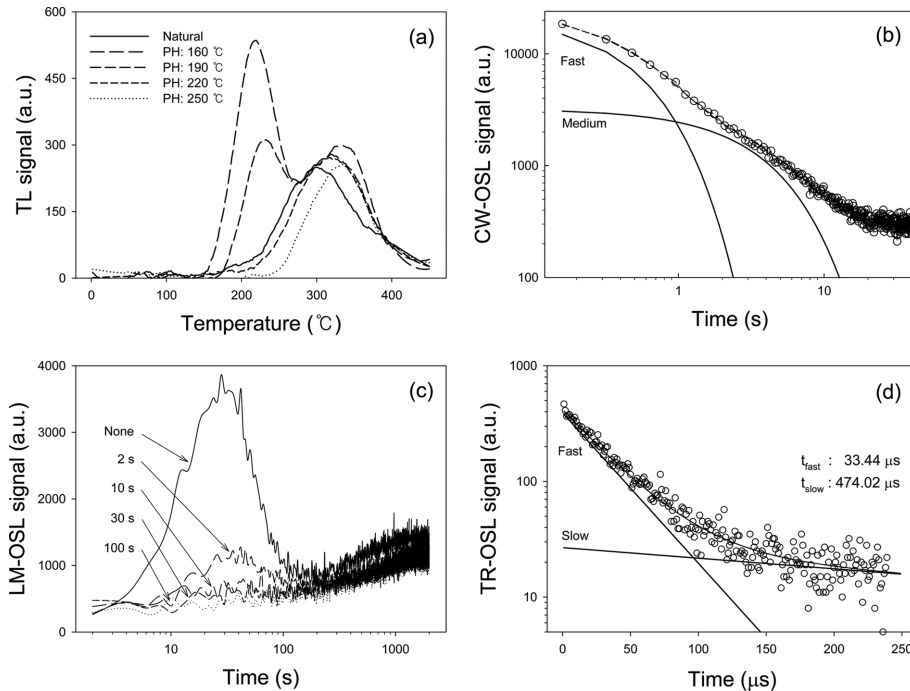


Fig. 3. TL/OSL characteristics obtained from the sample of JJM-KS3Re: TL glow curve (a), CW-OSL decay curve (b), LM-OSL signal (c) and TR-OSL signal (d).

조사된 석영 시료를 이용하여 각각 160, 190, 220, 250 °C에서 10초 동안 열전처리 후 측정된 TL 신호를 비교한 결과이며, 220 °C 이상의 온도에서 열전처리 후 측정된 TL 신호가 자연 TL 신호와 형태가 유사함을 알 수 있었다. 따라서 고고선량 측정에서 시료에 실험실 방사선 조사시 불안정한 뒷(110 °C TL 피크)에 포획된 전자를 제거하기 위하여 OSL 측정에 앞서 220 °C 이상에서 열전처리가 이루어져야 함을 알 수 있었다. Fig. 3(b)와 (c)는 CW-OSL (continuous-wave OSL)과 LM-OSL (linear-modulated OSL) 신호를 측정된 결과이다. CW-OSL 신호로부터 퇴적층 석영의 OSL 신호는 fast 성분과 medium 성분의 선형조합으로 이루어져 있고, 특히 광이온화 단면적이 매우 큰 fast 성분이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있었다. 또한 광표백(optical bleaching) 이후 측정된 LM-OSL 신호로부터 석영의 OSL 신호는 햇빛에 10초 정도만 노출되어도 완전히 사라짐을 알 수 있었다. 이와 함께 Fig. 3(d)의 TR-OSL 신호에서도 일반적인 석영의 lifetime을 갖는 fast 성분이 피크 면적의 대부분을 차지함을 알 수 있었다. 따라서 고산리 유적 퇴적층으로부터 추출된 석영 시료는 폐기 및 매몰 과정에서 절대연년이 매우 빠르고 완전

하게 이루어졌다고 판단되었다.

3.2. 열전처리 온도 결정

매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량은 Table 1에 요약된 단일시료재현법(single aliquot regenerative dose method, SAR method)⁸을 이용하여 주로 산출된다. 이 경우 석영 시료는 반복적인 실험실 방사선 조사, 열전처리, 광표백 등을 경험하게 된다. 특히 열전

Table 1. Sequences of SAR method

Step	Sequence	OSL intensity ^{b)}
1	Preheating at T °C ^{a)} for 10 s	
2	Blue LED stimulation for 40 s at 125 °C	L _x
3	Test dose irradiation, D _T	
4	Cut-heat to 220 °C	
5	Blue LED stimulation for 40 s at 125 °C	T _x
6	Regenerative dose, D _x and repeat from step 1	

a) For thermal transfer and plateau tests, six preheat temperatures, T °C, varied from 200 °C to 300 °C with 20 °C intervals were used. b) OSL intensity was derived from the initial 0.5 s integration which was subtracted using the background signal estimated from the last 2 s of CW-OSL decay curve.

처리하는 시료의 물리적 특성을 변화시키는 주된 요인이기 때문에, 이 연구에서는 표준단면 퇴적층 시료를 대상으로 열전이(thermal transfer) 및 플래토우 평가(plateau test)를 수행하여 열전처리 조건을 결정하였다.

열전이는 열전처리에 의하여 전자가 불순물 띠에 재포획되는 현상으로, 일부 석영시료에서 관찰되어져 왔다.^{9,10} 열전이가 발생하는 석영은 조사된 방사선량보다 높은 흡수선량을 나타내어 이에 대한 보정이 필요하다. 열전처리에 대한 안정성을 확인하기 위해 먼저 솔라 시뮬레이터 SOL2 (Honle/500S, UV technology)를 사용하여 표준단면 퇴적층 시료 중 일부를 완전히 절대영년 시켰다. 다음으로 10 Gy 실험실 방사선을 조사하고 blue LED로 40초 동안 광자극 하여 OSL 신호를 제거하였다. 열전이로 인한 흡수선량 증가를 평가하기 위하여 우선 200 °C에서 10초 동안 열전처리하고 단일시료재현법을 사용하여 흡수선량을 산출하였다. 위 과정을 열전처리 온도를 300 °C까지 20 °C 씩 온도를 증가시키며 반복하였다.¹¹ Fig. 4는 JJM-KS3Re 시료의 열전이로 인한 흡수선량 증가를 평가한 결과이며, 각 열전처리 온도에서의 흡수선량은 3개의 시료 디스크부터 얻어진 값을 평균하여 산출되었다. 고산리 유적의 모든 퇴적층 시료는 240 °C 이하의 열전처리 온도에서 열전이로 인한 흡수선량이 0.5 Gy 이하로 산출됨을 확인하였다. 따라서 이 연구에서는 열전이에 대한 보정을 수행하지 않았다.

단일시료재현법으로 산출되는 시료의 흡수선량은 열전처리 온도에 영향 받는 경우가 존재하므로, 이의 안정성을 확인하기 위하여 플래토우 평가를 수행하였다. 이를 위해 절대영년된 각 퇴적층 시료에 12 Gy의 실험실 방사선을 각각 조사한 후, 위와 동일한 방법으로 단일시료재현법을 적용하여 흡수선량을 산출하였

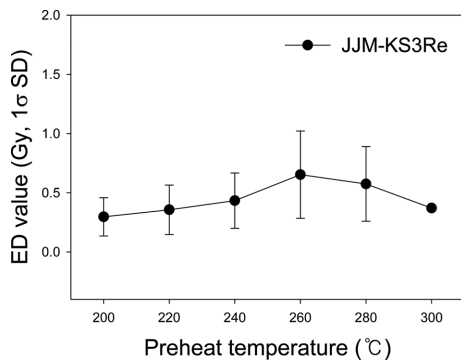


Fig. 4. Evaluation of thermal transfer caused by a preheat temperature.

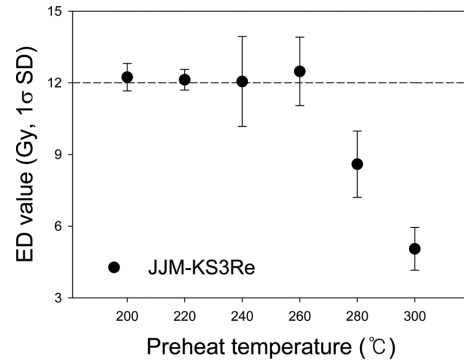


Fig. 5. Plateau test for examining the stability of equivalent dose (ED) against a preheat temperature.

다. Fig. 5는 JJM-KS3Re 시료에 대한 플래토우 평가 결과이다. 고산리 유적의 모든 퇴적층 시료는 260 °C 이하의 열전처리 온도에서 재현성이 높은 흡수선량이 산출되었으며, 특히 흡수선량의 편차를 고려하였을 때 220 °C 열전처리에서 가장 신뢰도 높은 흡수선량을 산출할 수 있었다.

고산리 유적 퇴적층 시료에 대한 열전이 및 플래토우 평가, TL 신호 특성(Fig. 3(a) 참고)을 모두 고려하였을 때, 시료의 흡수선량 산출을 위해 단일시료재현법을 적용할 경우 열전처리 온도는 220 °C가 최적임을 알 수 있었다. 따라서 이후의 연구에서는 열전처리 온도를 220 °C로 고정하였다.

3.3. 재현성 평가

단일시료재현법을 이용하여 흡수선량을 산출하기 앞서 다양한 크기의 방사선량을 절대영년 된 시료에 조사한 후 시료로부터 동일한 방사선량이 산출되는가에 대한 평가가 필요하며, 이를 재현성 평가(recovery test)라고 한다. 이를 위해 절대영년 된 고산리 유적 퇴적층 시료에 5 Gy에서 14 Gy까지 다양한 크기의 실험실 방사선을 조사한 후, 220 °C 열전처리 온도에서 단일시료재현법을 적용하여 흡수선량을 산출하였다. Fig. 6은 JJM-KS3Re 시료에 대한 플래토우 평가 결과이며, 주어진 각 방사선량에 대하여 산출된 재현선량은 각각 3 개의 시료 디스크로부터 얻어진 흡수선량을 평균하여 결정되었다.

고산리 유적 퇴적층 시료에 대한 재현성 평가 결과, 모든 퇴적층 시료는 14 Gy 이하의 범위에서 서로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 통해 열전처리 온도가 220 °C인 단일시료재현법을 적용할 경우 매장기간 동안 시료에 축적된 고고선량을 매우 정확하고 정

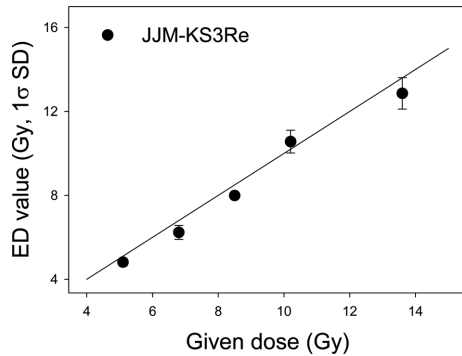


Fig. 6. Dose recovery test using the SAR method.

밀하게 결정할 수 있음을 알 수 있었다.

3.4. 고고선량 산출

고고선량은 열 또는 빛에 의해 절대영년 된 시료가 매장기간 동안 자기 자신 뿐만 아니라 주변토양에 존재하는 방사성핵종 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{87}Rb 등의 붕괴에 너지에 의해 시료에 누적된 흡수선량을 의미하며, 시료의 자연 OSL 세기를 실험실 방사선 조사에 의해 얻어진 OSL 세기와 상호 비교하여 구할 수 있다.

이 연구에서는 고산리 유적 퇴적층 시료의 TL 신호 특성과 열전이, 플래토우 평가 등을 종합하여 열전처리 온도를 220 °C로 고정한 후 Table 1에 제시된 단일시료재현법에 따라 각 퇴적층 시료의 흡수선량을 산출하였다. Fig. 7은 단일시료재현법을 이용하여 흡수선량을 산출한 예이며, 흡수선량은 실험실 방사선에 의한 OSL 세기(L_x/T_x)로부터 만들어진 선량반응곡선 (dose response curve)에 자연 OSL 세기(L_n/T_n)를 내삽하여 산출되었다. 또한 반복된 동일 실험실 선량에 대한 OSL 세기(Fig. 7의 “Δ”)를 중첩하여 단일시료재현법의 유효성을 검증하였다. 최종적으로 각 퇴적층 시

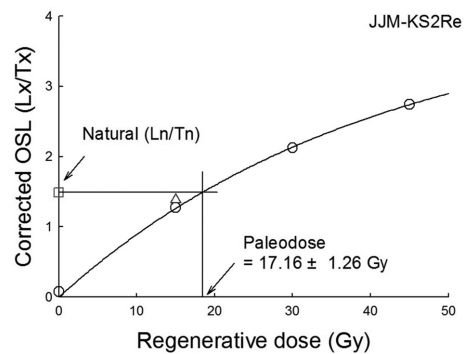


Fig. 7. An example of the evaluation of ED value using the SAR method.

료 당 25 개 이상의 흡수선량을 산출하였다.

고산리 유적 퇴적층의 고고선량은 각 퇴적층 시료로부터 산출된 흡수선량 값들을 통계 프로그램인 R project¹²에 대입하여 결정되었다. 먼저 고산리 유적의 강수량이 주변지역보다 낮아 가뭄으로 인한 재해가 자주 발생한다는 점, 주된 토양통이 산방통인 사양질계 화산회토이며 토양배수가 매우 양호하고 투수성과 유거가 빠르다는 점 등을 고려하여 고산리 유적 내 퇴적층 상부의 토양이 하부로 유입될 가능성이 높다고 판단하였다. 이를 바탕으로 시료의 흡수선량 분포를 바탕으로 가장 높은 고고선량 값을 산출하는 모델인 maximum age model¹³을 적용하여 고고선량을 산출하였다. 최종적으로 고산리 유적 퇴적층의 고고선량을 Table 2에 정리하였으며, 산출된 고고선량의 상대 오차는 모두 8% 미만으로 매우 정확하고 정밀하게 고고선량이 산출되었음을 확인하였다.

3.5. 연간선량을 산출

OSL 연대측정에서 연간선량은 고고선량과 함께

Table 2. OSL dating results of five soil samples collected from Gosan-ri archaeological site

Soil layer	Sample	Effective aliquot	Paleodose ^{a)} (Gy)	Annual dose rate (Gy/ka)			Total dose rate ^{b)}	OSL Age (ka, 1σ SD)
				Gamma	Beta	Cosmic ray		
5	JJM-KS1Re	49	18.97±1.48	0.60±0.04	0.62±0.04	0.19±0.01	1.41±0.06	11.44±1.20 BC
4	JJM-KS2Re	68	17.16±1.26	0.62±0.04	0.71±0.05	0.19±0.01	1.52±0.06	9.28±0.94 BC
3	JJM-KS3Re	87	8.99±0.48	0.58±0.04	0.64±0.04	0.19±0.01	1.41±0.06	4.37±0.42 BC
	JJM-KS4Re	29	6.03±0.49	0.66±0.04	0.82±0.05	0.19±0.01	1.65±0.06	1.64±0.33 BC
2	JJM-KS5Re	28	1.71±0.14	0.44±0.03	0.52±0.03	0.19±0.01	1.15±0.07	0.52±0.14 AD

^{a)}Using the SAR method⁸ with preheat at 220 °C, paleodose was evaluated from quartz grain sample ranging from 90–250 °C.

^{b)}Total dose rate was corrected for water content using Zimmerman's formula¹⁷ and took account for beta attenuation through the grains by a factor of 0.9.

연대를 결정하기 위한 필수 요소이다. 일반적으로 연간선량율은 시료를 중심으로 30 cm 이내에서 등방성(homogeneity)을 고려하여 채취한 주변토양으로부터 방사성핵종 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 등의 농도(mg/kg)를 구한 후 변환인자(conversion factor)를 사용하여 계산된다.^{14,15}

이 연구에서는 연간선량을 산출을 위해 고산리 유적 퇴적층 시료와 함께 채취된 주변토양에 대해 감마선 핵종분석을 수행하여 방사성핵종 농도를 측정하였다. 연간선량을 중 베타선량율과 감마선량율은 측정된 각 방사성핵종 농도에 변환인자를 대입하여 계산되었으며, 우주선량율은 토양의 밀도를 1.85 g/cm^3 으로 가정한 후 표토로부터 시료까지의 깊이를 Prescott and Hutton의 공식에 대입하여 산출하였다.¹⁶ 하지만 알파입자에 의한 연간선량율은 실험실에서 석영을 불산으로 한 시간 정도 처리하여 표층을 약 $10 \mu\text{m}$ 정도에 청시켰기 때문에 고려하지 않았다. Table 2에 정리된 연간선량율은 불산의 에칭으로 인한 베타선량율의 손실과 시료의 수분 함량에 대한 보정을 고려하여 최종적으로 결정되었다.¹⁷

3.6. OSL 연대 산출

고산리 유적 퇴적층 시료의 OSL 연대는 열전처리 온도가 $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 고정된 단일시료재현법을 이용하여 산출된 고고선량과 시료 주변토양에 감마선 핵종분석을 적용하여 산출된 연간선량율을 식 (1)에 대입하여 계산하였고, 오차는 1σ 표준편차로 표현하였다. 이 연구에서 얻어진 고산리 유적 퇴적층 시료의 OSL 연대를 Table 2에 정리하였으며, 이들 OSL 연대는 각 퇴적층의 최종 매몰 시점을 의미하므로 고산리 유적의 형성 및 점유시점과 관련하여 해석 가능하다.

4. 고찰

현재 OSL 연대측정은 제4기 퇴적층 자체를 연대 측정하여 퇴적시점을 결정할 수 있는 유일한 절대연대측정법이며, 퇴적층의 OSL 연대는 이 층이 상부 토양에 의해 매몰된 이후부터 현재에 이르기까지 경과된 시간을 의미한다. 고산리 유적은 후빙기 이후 기후가 따뜻해지며 해수면이 상승하고 식생과 동물상 등의 급격한 환경변화가 발생한 신석시대 초기의 유적이다. 따라서 퇴적층 시료의 절대연년이 완벽히 이루어졌을지라도 퇴적층이 절대연년된 시점과 매몰시점간의 시간차(time-lag), 후퇴적, 매장기간 중 주변 환경의 급격한 변화 등이 예상된다면 OSL 연대의 해석

및 적용에 세심한 주의가 필요하다. 이 장에서는 고산리 유적 퇴적층에서 채취한 퇴적층 시료의 OSL 연대와 유적 내 유구에서 채취된 목탄의 ^{14}C 연대결과 등을 종합하여 고산리 유적의 형성 및 점유, 폐기 과정을 순차적으로 추론하였다.

고산리 유적의 시층서(時層序) 복원을 위한 표준단면 내 퇴적층의 OSL 연대는 ① 석영 물질의 빠른 광표백 특성, ② 시료의 흡수선량 산출에 적용된 단일시료재현법의 신뢰성, ③ 유적 및 유구 간의 복잡한 상호 중복관계, ④ 자연환경에 의한 유적 내 잦은 후퇴적 및 퇴적물의 혼재 등을 고려하여 결정되어야 하며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 이 중 가장 아래층인 화산쇄설물층(5층, JJM-KS1Re)은 고산리 유적 주변의 당산봉과 수월봉의 수중화산활동과 관련이 있는 층으로써, OSL 연대측정 결과 이 층은 기원전 11,000년 이전에 화산활동의 종료와 함께 형성되었음을 알 수 있었다. 그 상부에 위치한 암갈색사질점토층(4층, JJM-KS2Re)은 유적의 생토층에 해당하며, 기원전 9천년 이전에 형성되어 현재와 유사한 지형을 형성하였음을 알 수 있었다. 특히 고산리 유적 내 유구는 대부분 생토층인 암갈색사질점토층(4층)과 그 상부인 문화층(3층)의 경계 부분에서 확인되고 있다.¹ 이는 생토면을 굴착하여 유구가 축조되었다는 것을 반증하며, 고산리 유적의 형성이 기원전 9천년 이후에 해당함을 의미한다.

고산리 유적의 점유 및 폐기시점은 유구의 매몰 연대와 관련된다. 매몰토(JJM-KS3Re)의 OSL 연대측정 결과 유구는 기원전 4천년 중반 이전에 매몰되었음을

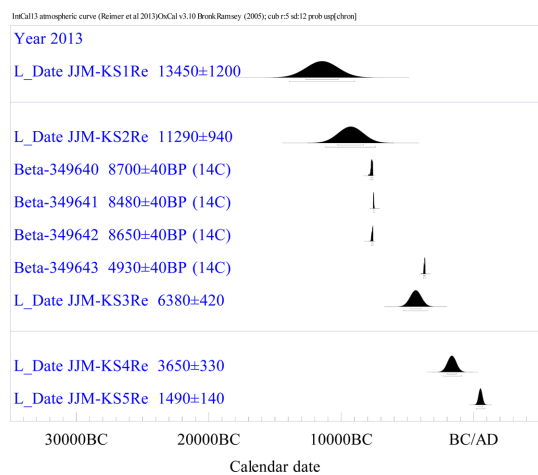


Fig. 8. Evaluation of the formation and occupation of the Gosan-ri site from the resultant OSL dates referring to radiocarbon dates.

알 수 있었다. 또한 매몰토와 문화층(3층, JJM-KS4Re)에는 고산리식 토기와 함께 시기를 달리하는 용기문 토기편과 무문양토기편도 함께 확인되고 있어 신석기 초기부터 고산리 유적이 장기간 점유되어졌음을 알 수 있었다.¹ Fig. 8에 도시된 것처럼 유구 내에서 채취된 목탄의 14C 연대도 기원전 7,600년경과 4,000년경의 두 그룹으로 나타났으며, 이는 고산리 유적에 다양한 시기의 다양한 유구가 존재했다는 것에 대한 또 다른 증거이다. 문화층의 OSL 연대로부터 신석기시대부터 일정 규모 이상의 취락이 형성되었던 것으로 추정되는 고산리 유적은 기원전 1,500년 경에 자연적으로 완전 매몰되었으며, 이후 자연퇴적층인 흑색사질점토층(2층, JJM-KS5Re), 후대 경작층(1층)이 차례로 퇴적되어 현재와 같아졌다고 판단된다.

그러므로 고산리 유적은 신석기인들에 의해 기원전 9천년 이후에 형성된 이후 고산리식 토기를 포함하는 신석기시대 초기 유적에서부터 다양한 시기의 다양한 유구가 존재해 오다가 최종적으로 기원전 4천년 중반에 폐기되어 현재에 이르렀다고 추론된다.

5. 결 론

고산리 유적은 우리나라 최초 토기로 알려진 고산리식 토기가 출토된 초기 신석기시대 유적이다. 이 연구에서는 고산리 유적의 형성 및 점유에 대한 절대연대 편년을 위하여 유적 내 표준 퇴적층에서 채취된 시료를 대상으로 OSL 연대측정을 수행하였다.

고산리 유적 퇴적층 시료에서 추출한 석영 시료의 TL/OSL 신호 관찰 결과, 빛에 매우 민감한 fast 성분이 대부분을 차지하고 있었으며 매우 짧은 시간 안에 절대연년이 완벽히 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 열전이 및 플래투우 평가, 재현성 평가를 통해 결정된 220 °C 열전처리를 적용한 단일시료재현법으로부터 매우 신뢰성 높은 흡수선량을 산출하였다. 각 퇴적층의 고고선량은 유적의 퇴적환경을 고려하여 maximum age model을 적용하여 결정되었다. OSL 연대측정 결과, 고산리 유적은 신석기인들에 의해 기원전 9천년 이후에 형성된 이후 고산리식 토기를 포함하는 신석기시대 초기 유적에서부터 다양한 시기의 다양한 유구가 존재해 오다가 최종적으로 기원전 4천년 중반에 폐기되어 현재에 이르렀다고 추론된다.

최종적으로 고산리 유적의 절대연대 편년은 우리나라 최초 토기인 고산리식 토기의 연대결정 뿐만 아니라 구·신석기시대 전환 연구, 초기 신석기시대 문화

복원 등에 크게 기여하리라 예상된다.

감사의 글

이 연구는 (재)제주문화유산연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이 연구를 위해 고산리 유적의 퇴적층 시료 제공 및 고고학적 조연을 해주신 고재원 부원장님과 방문배 부장님을 비롯한 관계자 분들께 감사드립니다.

References

1. J. W. Go, K. J. Kim and M. B. Bang, 'The Jeju Gosan-ri Site', Jeju Cultural Heritage Institute, 2014.
2. M. J. Aitken, 'An introduction to optical dating', Oxford University Press, London, 1998.
3. S. J. Fleming, *Archaeometry*, **12**, 133-147 (1970).
4. N. A. Spooner, M. A. Aitken, B. W. Smith, M. Franks and C. McElroy, *Radiat. Prot. Dosim.*, **34**, 83-86 (1990).
5. L. Botter-Jenson, E. Bulur, G. A. T. Duller and A. S. Murray, *Radiat. Meas.*, **37**, 535-541 (2003).
6. M. J. Kim, K. W. Song and D. G. Hong, *New Physics: Sae Mulli*, **53**, 171-177.
7. M. J. Kim, J. H. Choi and D. G. Hong, *Radiat. Meas.*, **46**, 1518-1521 (2011).
8. A. S. Murray and A. G. Wintle, *Radiat. Meas.*, **37**, 377-381 (2003).
9. E. J. Rhodes and L. Pownall, *Radiat. Meas.*, **23**, 329-333 (1994).
10. E. J. Rhodes and R. M. Bailey, *Quat. Sci. Rev.*, **16**, 291-298 (1997).
11. E. J. Rhodes, *Radiat. Meas.*, **32**, 595-602 (2000).
12. S. Kreutzer, C. Schmidt, M. C. Fuchs, M. Dietze, M. Fischer and M. Fuchs, *Ancient TL*, **30**, 1-8 (2012).
13. R. F. Galbraith and R. G. Roberts, *Quat. Geochronol.*, **11**, 1-27 (2012).
14. K. S. V. Nambi and M. J. Aitken, *Archaeometry*, **28**, 202-205 (1986).
15. J. M. Olley, A. S. Murray and R. G. Roberts, *Quat. Sci. Rev.*, **15**, 751-760 (1996).
16. J. R. Prescott and J. T. Hutton, *Radiat. Meas.*, **23**, 497-500 (1994).
17. J. Zimmerman, *J. Phys. C: Solid State Physics*, **4**, 3277-3291 (1971).