AD 1950년 전후 고고유적의 절대연대측정에 대한 고찰: 오송 봉산리 옹기가마 유적을 중심으로

김명진¹ | 손명수 | 김태홍* | 성기석**

(주)라드피온 고고과학연구소, *(재)한국선사문화연구원 조사연구실, **(주)카본에널리시스랩

The Development of Earthenware Kilns in Bongsan-ri Archaeological Site, Osong: Implications for Pre- and Post-1950 AD Absolute Age Determination

Myung Jin Kim¹ | Myoung Soo Son | Tae Hong Kim* | Ki Seok Sung**

Archaeological Science Institute, RADPION Inc., Daejeon, 34111, Korea

*Department of Archaeology, Institute of Korean Prehistory, Cheongju, 28763, Korea

**Carbon Analysis Lab Inc., Daejeon, 34570, Korea

¹Corresponding Author: nwdang@archaeometry.kr, +82-42-364-8589

초 록 이 연구에서는 19세기 말부터 20세기 후반까지 사용된 것으로 알려진 오송 봉산리 옹기가마 유적에서 채취된 가마벽체 시료를 대상으로 TL/OSL 연대측정을 수행하였다. 고고선량은 SAR-TL/OSL법을 이용하여 측정된 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량(ED_{burial}), 배경선량(ED_{BG}), fading 보정인자(f), 과대산출 보정인자(C)로부터 결정되었다. 또한 연간선량을 및 원산지는 시료의 자연방사능핵종(^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)을 분석하여 산출되었다. 각 옹기가마의 TL/OSL 연대와 방사성탄소 연대를 비교 검토한 결과, 본 유적과 같은 근·현대 고고유적의 절대연대 편년을 위해서는 TL/OSL 연대측정과 방사성탄소 연대측정을 함께 수행하여 결합연대를 산출하는 것이 타당하다고 판단되었다. 오송 봉산리 옹기가마 유적의 조성 및 운영시기가 I 단계(5호, 6호 옹기가마)→II 단계(1호, 2호, 3호 옹기가마)→III 단계(4호 옹기가마)로 변천된다는 사실에 근거하여 베이저안 통계분석을 수행한 결과, 가장 이른 시기인 I 단계 옹기가마들의 사용 및 폐기시점은 1910 ± 23 년, II 단계는 1970 ± 10 년, III 단계는 1987 ± 4 년으로 각각 절대연대 편년되었으며, 이는 고고학적 편년관과도 정확히 일치하였다.

중심어: 봉산리 유적, 옹기가마, TL/OSL 연대측정, 14C 연대측정, 근·현대 유적

ABSTRACT We conducted TL/OSL dating for the earthenware kilns in the Bongsan-ri archaeological site, Osong, which was occupied from the late nineteenth to the late twentieth century. With the SAR-TL/OSL method, paleodose was determined from the equivalent dose during the burial period(ED_{burial}), the background dose(ED_{BG}), the fading correction factor(f), and the overestimation correction factor(C). The annual dose rates and their provenance were evaluated from the measurement of natural radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K . Because the comprehensive absolute age was provided by combining the resulting TL/OSL and radiocarbon data, we concluded that, for the absolute chronology of a modern archaeological site, TL/OSL dating and radiocarbon dating must be carried out together and summed. The construction

and occupation of earthenware kilns in the Bongsan-ri site had changed from stage I (No.5, 6 kilns), to stage II (No.1, 2, 3 kilns), to stage III (No.4) in chronological order. When Bayesian statistics were applied, we found that the absolute ages of occupation for stages I, II, and III correspond to AD 1910 $\pm$ 23, AD 1970 $\pm$ 10, and AD 1987 $\pm$ 4. These results were in good agreement with the archaeological context or chronology.

Key Words: Bongsan-ri archaeological site, Earthenware kiln, TL/OSL dating, 14C dating, Modern archeological site

1. 서 론

고고유적에 적용되는 절대연대측정법은 시간에 관계하는 물리량의 종류에 따라 다양한 방법론이 존재하며, 방사성 동위원소의 물리적 특성에 기초한 동위원소법(radio-isotopic method)과 고지자기의 시간에 따른 변화를 추적하는 고지자기법(paleomagnetic method), 유기물의 속성작용이나 화학적 성질 변화, 생명활동을 측정하는 화학 및 생물학적 방법(chemical and biological method) 등으로 구분된다. 이중 방사성탄소 연대측정(radiocarbon dating)은 우리나라 고고유적에서 출토되는 시료의 종류 및 상태, 매장환경을 고려했을 때 현재 가장 많이 적용되는 절대연대측정법이다(Kim, 2011).

방사성탄소 연대측정에서 시료의 연대는 탄소동위원소 ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C 농도비로부터 산출되며 AD 1950년을 기준 0년으로 하여 BP(before present)로 표현된다. 그러나 지난 5만년 동안 대기 중의 방사성탄소 ^{14}C 의 농도가 지속적으로 변화해 왔으며, 최근에는 18세기 중반에 시작된 산업혁명과 1950년대 중반부터 1960년대 후반까지 주로 실행되었던 대기 중 원폭 실험으로 인해 정확한 역연대(calendar age) 산출을 위해서는 이에 대한 보정이 필수적이다. 현재 1950년 이전의 방사성탄소 연대 보정을 위해서는 전세계적으로 IntCal13 보정곡선(Reimer *et al.*, 2013)이 사용되며, 1950년 이후 북반구 중위도지역의 방사성탄소 연대 보정에는 Bomb13NH2 밤 피크(bomb peak)(Hua *et al.*, 2013)가 주로 사용된다. 이로부터 1950년을 전후한 근·현대 고고유적에 대한 방사성탄소 연대측정 시 Figure 1에서 보는 바와 같이 다음과 같은 문제점이 존재한다. 첫째, 250~0 yr BP 사이의 방사성탄소 연대는 모두 유사한 역연대를 같으며 연대 범위가 약 300년 정도로 매우 크다. 둘째, 1950년 이후의 방사성탄소 연대는 1960년대 중반에서 최댓값을 갖는 밤 피크로 인해 항상 2개의 역연대가 산출된다. 따라서 1950년을 전후한 근·현대 고고유적에 대한 정확한 절대연대 편년을 위해서는 방사성탄소 연대측정 외에 다른 절

대연대측정법이 별도로 요구된다.

우리나라 고고유적에서 방사성탄소 연대측정법 다음으로 많이 적용되는 TL/OSL 연대측정법은 석영, 장석, 방해석 등의 무기광물을 포함하는 토기, 기와, 화덕자리, 가마, 경작층, 구석기문화층 등의 유물 및 유구에서 열발광(thermoluminescence, TL) 또는 광발광(optically stimulated luminescence, OSL) 측정하여 연대를 산출한다. TL/OSL 연대측정은 연대측정 대상 시료가 유물이나 유구 그 자체라는 점, 석영과 장석 등의 무기광물은 토양을 구성하는 주 광물이므로 시료의 제한이 없다는 점, 그리고 연대측정의 상한과 하한 폭이 현재부터 구석기시대까지 모두 포함한다는 장점이 있다(Kim, 2011). 특히 TL/OSL 연대측정은 유기질 시료를 대상으로 하는 방사성탄소 연대측정과 달리 무기질 시료를 대상으로 하기 때문에 고고유적의 절대연대 편년에서 상호 보완적인 관계에 있다.

이 연구에서는 19세기 말부터 20세기 후반까지 사용된 것으로 알려진 오송 봉산리 웅기가마 유적에서 가마벽체 시료를 채취하여 TL/OSL 연대측정을 수행하였다. 또한 동일한 웅기가마에서 채취한 목탄 시료를 대상으로 방사성탄

Figure 1. Radiocarbon dates of the charcoal samples collected from the earthenware kilns in Bongsan-ri archaeological site.

소 연대측정도 진행하였다. 이후 TL/OSL 연대와 방사성탄소 연대를 통계적으로 결합하여 각 옹기가마의 사용시점과 변천과정을 절대연대 편년하였다. 최종적으로 오송 봉산리 옹기가마 유적에 적용된 TL/OSL 연대측정과 방사성탄소 연대측정의 장단점을 비교 평가하여 1950년을 전후한 근현대 고고유적에 대한 절대연대측정 방법론을 새롭게 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료

오송 봉산리 옹기가마 유적은 충청북도 청주시 흥덕구 오송읍 봉산리 345-1번지 일원에 입지한다. 유적 내에서는 구석기문화층 및 옹기생산시설, 토광묘, 수혈유구 등이 발굴 조사되어 구석기시대부터 현재까지 선사인들에 의해 지속적으로 점유 및 이용되어왔음을 알 수 있었다. 특히 옹기생산시설과 관련된 유구로 옹기가마 6기와 폐기장 등이 확인되었으며(Figure 2), 옹기가마의 구조 및 출토유물 등을 종합하여 볼 때 가마조성 및 운영 시기는 3단계의 변천과정을 거친 것으로 파악되었다. 우선 I 단계에 해당하는 5호,

6호 옹기가마의 조성 및 운영 시기는 19세기 말~20세기 초로 추정되며, II 단계의 1호, 2호, 3호 옹기가마는 1950~1970년대, III 단계의 4호 옹기가마는 1970년 이후로 판단된다(Institute of Korean Prehistory, 2018).

이 연구에서는 오송 봉산리 옹기가마 유적의 TL/OSL 연대측정을 위해 각 옹기가마의 연소실 또는 소성실에서 가마벽체를 시료로 채취하였다. 이를 위해 가장 빠른 시기로 추정되는 I 단계 6호 기와가마(OSK1, 2)에서는 소토화된 진흙벽체를 시료로 채취하였으며, II 단계 1호 옹기가마(OSK3), 2호 옹기가마(OSK4, 5), 3호 옹기가마(OSK6, 7)에서는 흙벽돌을, III 단계 4호 옹기가마(OSK8, 9)에서는 점토벽돌을 각각 채취하였다. 또한 TL/OSL 연대측정의 신뢰성 검증을 위해 1호 옹기가마를 제외한 모든 옹기가마에서 시료를 2개씩 중복해서 채취하였다(Table 1). 채취된 시료를 암실로 옮긴 후 고고선량(paleodose) 및 연간선량을(annual dose rate) 산출을 위해 시료를 두 부분으로 나누었다. 먼저 고고선량 산출용 시료로부터 석영 시료 추출을 위해 빛에 노출된 겉면을 2 mm 이상 충분히 제거하였다. 이후 빛에 노출되지 않은 시료 내부를 마노유발(agate-mortar)을 이용하여 잘게 부수고 표준 그물망체(standard sieve)를 이용하여 90~250 μm 크기의 입자만을 선별하였다. 고고선량 산출에 필요한 석영 시료는 석회 및 유기물 제거를 위한 산·염기 처리 후 48% 불산(HF)으로 한 시간 정도 처리하여 추출하였다(Fleming, 1970). 석영 시료의 장식 오염도를 확인하기 위해 미량을 임의로 채취하여 적외선 광자극 시켰을 때 OSL 신호가 검출되지 않았기 때문에 장식으로 인한 오염은 없다고 판단하였다(Spooner *et al.*, 1990). 다음으로 연간선량을 산출용 시료를 건조기에서 충분히 건조시킨 후 감마선 분광분석을 위해 마노 유발을 이용하여 90 μm 정도의 입자 상태로 분쇄하였다. 분쇄된 시료를 감마선 측정용 시료용기에 담아 밀봉한 후 방사평형을 위해 40일간 보관하였다(Kim *et al.*, 2013).

이 연구에서는 TL/OSL 연대측정과 별도로 방사성탄소 연대측정을 위해 2호, 4호, 5호, 6호 옹기가마 내부에서 목탄 시료를 채취한 후 두 부분으로 나누어 Beta Analytic Inc.(USA)과 (주)카본에널리시스랩(Korea)에 각각 분석 의뢰하였다.

2.2. 실험기기

고고선량 산출을 위한 TL/OSL 측정은 Riso TL/OSL reader(Riso TL/OSL-DA-20, DTU Nutech, Denmark)를 이용

Figure 2. Spatial distribution of the earthenware kiln in Bongsan-ri archaeological site.

하여 수행하였다(Botter-Jenson *et al.*, 2003). 시료의 TL 신호 측정을 위해 Kanthal strip 히터를 이용하여 시료를 실온에서부터 400°C까지 선형적으로 가열했으며, TL 신호는 Schott BG-3, BG-39 필터와 결합된 광전자증배관(EMI 9635QA photomultiplier)으로 검출되었다. 또한 OSL 신호 측정을 위해 시료의 온도를 125°C로 유지함과 동시에 470±20 nm의 파장을 가진 청색 발광 다이오드(Nichia type NSPB-500S)를 이용하여 40초 동안 광자극 하였으며 광원의 세기는 50 mW/cm² 정도이다. 자극광과 OSL 신호의 분광을 위하여 자극광원 앞에 Schott GG420 필터를 부착하였고 광전자증배관 앞에는 Hoya U-340 필터를 부착하였다. TL/OSL 측정에서 검출기의 전기적 잡음(electric noise) 및 시간에 독립적인 배경 신호(background signal)는 20 counts/s 이하였다. 상온에서 시료에 조사되는 전리성 에너지는 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 베타선원으로부터 제공되며 시료가 받는 흡수선량율(absorbed dose rate)은 6.7 mGy/s이다.

연간선량을 산출을 위한 자연방사성핵종 ⁴⁰K, ²³²Th,

²³⁸U의 농도는 한국기초과학지원연구원에 설치된 고순도 게르마늄 검출기[HPGe gamma detector, Mirion Technologies Inc., USA(상대효율: 30%)]를 이용하여 측정되었다.

3. 결 과

3.1. TL/OSL 신호 특성

오송 봉산리 웅기가마 유적에서 채취된 가마벽체 시료에 대한 TL/OSL 연대측정에 앞서 각 시료로부터 방출되는 TL/OSL 신호의 물리적 특성을 먼저 파악하였다. 이를 위해 각 시료로부터 추출한 석영 시료를 이용하여 시료별 6개씩 시료디스크(aliquot)를 만든 후 Riso TL/OSL reader에서 400°C까지 가열하여 절대영점(thermal zeroing)시켰다. 이후 각 시료디스크에 350 mGy 베타선을 균일하게 조사한 후 3개 시료디스크는 TL 신호를 측정하였고, 나머지 3개 시료디스크는 OSL 신호를 측정하였다.

Figure 3. Physical characteristics of the sample of the earthenware kiln. (a) Typical TL glow curve, (b) Typical OSL decay curve, (c) The comparison of TL/OSL intensity measured from the same kiln sample, (d) Sensitivity change normalized using the first TL/OSL measurement.

Figure 3a에 각 시료로부터 측정된 TL 신호 중 OSK8(4호 옹기가마) 시료의 TL 신호를 예시하였다. TL 신호는 90, 200, 290℃에서 총 3개의 피크를 나타냈으며, 이 중 90℃ 피크는 불안정한 트랩(trap)에서 방출되는 냉광수명(luminescence lifetime)이 매우 짧은 TL 신호로 보이며 200, 290℃ 피크는 안정한 트랩에서 방출되는 냉광수명이 긴 TL 신호로 판단되었다. 일반적으로 TL 신호를 이용한 연대측정에서는 피크의 냉광수명과 신호 세기가 중요한 요소이다. 200℃ 피크와 290℃ 피크를 비교하였을 때 290℃ 피크의 냉광수명은 $\sim 10^8$ 년 수준으로 $10^3 \sim 10^5$ 년 사이인 200℃ 피크보다 1,000 배 이상 큰 것으로 알려져 있다(Aitken, 1985). 하지만 오송 봉산리 옹기가마 유적의 가마조성 및 운영시기가 최근 100 년 내외라는 사실로부터 200℃ 피크를 이용한 연대측정도 유효하다(Woda *et al.*, 2011). 또한 200℃ 피크의 신호 세기가 290℃ 피크보다 크기 때문에 계수오차가 작아져 보다 정밀한 연대산출이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 이 연구에서는 200℃ TL 피크를 이용하여 가마벽체 시료의 TL 신호 특성 파악 및 연대측정을 진행하였다. 이와 함께 Figure 3b에 각 시료로부터 측정된 OSL 신호 중 OSK6(3호 옹기가마) 시료의 OSL 신호를 예시하였다. OSL 신호는 지수적으로 감소하여 측정 후 1초 안에 대부분 소멸됨을 알 수 있었다. 이는 OSL 신호의 대부분이 열과 빛에 매우 민감한 fast 성분으로 이루어져 있으며 높은 절대영년도로 인해 OSL 신호를 이용한 연대측정에 매우 적합함을 의미한다(Kim *et al.*, 2011). 따라서 이 연구에서는 측정 후 1초 동안의 OSL 신호 세기를 이용하여 가마벽체 시료의 OSL 신호 특성 파악 및 연대측정을 진행하였다.

가마벽체 석영 시료의 방사선에 대한 민감도 평가를 위해 앞서 350 mGy 베타선을 조사하여 측정된 TL 신호 중 200℃ 피크 영역(170~250℃)을 합하여 TL 세기(TL₃₅₀)를 산출하였고, OSL 신호 중 최초 1초 동안의 세기를 합하여 OSL 세기(OSL₃₅₀)를 산출하였다. 이들 시료디스크에 다시 150 mGy 베타선을 균일하게 조사한 후 TL/OSL 신호를 측정하여 각 시료디스크의 TL 세기(TL₁₅₀) 및 OSL 세기(OSL₁₅₀)를 산출하였다. 이를 이용하여 각 시료디스크 간의 질량차가 보정된 350 mGy 베타선에 대한 TL 세기(TL₃₅₀/TL₁₅₀) 및 OSL 세기(OSL₃₅₀/OSL₁₅₀)를 산출하였다. 350 mGy 베타선에 대한 TL/OSL 민감도는 시료별 3개씩의 시료디스크로부터 얻어진 값을 평균하여 얻어졌고, 이들 TL 평균 세기 및 OSL 평균 세기들 중 최댓값을 이용하여 각각 규격화(normalization) 하였다. Figure 3c에서 보는

바와 같이 OSK3(1호 옹기가마), OSK4, 5(2호 옹기가마 1, 2), OSK8, 9(4호 옹기가마 1, 2) 시료는 TL 신호가 OSL 신호보다 방사선에 대한 민감도가 매우 높았다. 이와 반대로 OSK1, 2(6호 옹기가마 1, 2), OSK6, 7(3호 옹기가마 1, 2) 시료는 OSL 신호가 TL 신호보다 방사선에 대한 민감도가 매우 높았다. 따라서 1호, 2호, 4호 옹기가마 시료는 TL 연대측정에 적합하다고 판단되며 6호, 3호 옹기가마는 OSL 연대측정에 적합하다고 판단되었다.

TL/OSL 연대측정에서 매장기간 동안 시료에 측정된 흡수선량은 단일시료재현법(single aliquot regenerative dose method, SAR)을 사용하여 주로 산출된다(Murray and Wintle, 2003). 이 경우 시료는 반복적인 방사선 조사, 열처리, TL/OSL 측정으로 인해 민감도 변화가 발생한다. 오송 봉산리 옹기가마 유적에서 채취된 가마벽체 시료의 TL/OSL 민감도 변화를 관찰하기 위하여 400℃까지 가열하여 절대영년 된 시료디스크를 시료당 3개씩 새로 준비하였다. 이들 시료디스크에 150 mGy 베타선을 균일하게 조사한 후 OSK3(1호 옹기가마), OSK4, 5(2호 옹기가마 1, 2), OSK8, 9(4호 옹기가마 1, 2) 시료는 TL 신호를 측정하였고 OSK1, 2(6호 옹기가마 1, 2), OSK6, 7(3호 옹기가마 1, 2) 시료는 OSL 신호를 각각 측정하였다. 각 시료의 TL/OSL 신호 세기는 위와 같이 3개씩의 시료디스크로부터 얻어진 값을 평균하여 얻어졌고, 이 과정을 6회 반복하였다. Figure 3d에서 보는 바와 같이 OSL 측정의 경우 모든 시료에 대하여 민감도 변화가 거의 발생하지 않았다. 그러나 TL 측정의 경우 측정횟수에 따라 민감도는 급격하게 증가했으며 6번째 반복 측정했을 때 민감도는 최초 측정에 비해 10배 이상 증가되었다. 특히 OSK5 시료는 약 20배 정도 민감도가 증가함을 알 수 있었다. 이는 흡수선량 산출을 위해 SAR-TL 법(Hong *et al.*, 2006)을 적용하더라도 반복측정에 따른 민감도 보정이 제대로 이루어지지 않아 정확한 흡수선량을 산출할 수 없을 가능성이 있음을 의미한다.

오송 봉산리 옹기가마 유적에서 채취된 가마벽체 시료의 TL/OSL 신호에 대한 물리적 특성을 관찰한 결과, 흡수선량 산출을 위해 1호, 2호, 4호 옹기가마 시료는 200℃ TL 피크를 이용한 SAR-TL법을 적용하고 6호, 3호 옹기가마는 최초 1초 동안 측정된 OSL 세기를 이용한 SAR-OSL법을 적용하는 것이 타당하다고 판단되었다. 다만 SAR-TL법을 적용할 경우 흡수선량이 과소 및 과대 산출될 가능성에 대한 검토가 요구된다.

3.2. 고고선량

TL/OSL 연대측정에서 고고선량은 절대영년 된 시료에 매장기간 동안 축적된 흡수선량을 의미하며, 일반적으로 식 (1)로부터 산출 가능하다(Woda *et al.*, 2012).

$$PD(mGy) = \frac{ED_{burial} - ED_{BG}}{fC} \quad \text{식 (1)}$$

위 식에서 ED_{burial} 은 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량을 의미하며, ED_{BG} 은 시료의 부분적인 절대영년, 매장기간 또는 TL/OSL 측정 과정에서의 thermal transfer, phototransfer 등에 의해 시료에 잔존하는 배경선량을 뜻한다. 또한 f 는 열적(thermal) 또는 비정상적인(anomalous) fading 현상으로 인한 흡수선량의 과소산출(underestimation)을 보정하는 인자이며, C 는 자연 시료의 TL/OSL 측정 이후 발생하는 급격한 민감도 변화로 인한 흡수선량의 과대산출(overestimation)을 보정하는 인자이다.

이 연구에서는 가마벽체 시료의 TL/OSL 신호 특성을 바탕으로 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량 ED_{burial} 산출을 위해 OSK3(1호 옹기가마), OSK4, 5(2호 옹기가마 1, 2), OSK8, 9(4호 옹기가마 1, 2) 시료에 SAR-TL 법(Hong *et al.*, 2006)을 적용하였다. 이와는 별도로 OSK1, 2(6호 옹기가마 1, 2), OSK6, 7(3호 옹기가마 1, 2) 시료에는 SAR-OSL 법(Murray and Wintle, 2003)을 적용하였다(Figure 4). SAR-TL/OSL법은 자연 TL/OSL 세기(L_N/T_N)를 실험실 방사선에 의한 TL/OSL 세기(L_X/T_X)로부터 만들어진 선량반응곡선(dose response curve)에 각각 내삽하여 흡수선량을 산출한다. 또한 실험실 조사 없이 측정된 TL/OSL 세기(L_0/L_X)의 표준편차(3σ)를 이용하여 최소검출선량(minimum detectable dose, MDD)의 산출도 가능하다(Kim *et al.*,

2013). 이와 함께 recuperation 값과 recycle ratio 값으로부터 단일시료재현법의 건전성을 평가할 수 있다. 이 연구에서는 각 시료로부터 10개씩의 시료디스크를 측정하여 흡수선량과 최소검출선량을 산출하였고, 이를 Table 1에 정리하였다. 또한 각 시료의 recuperation 값과 recycle ratio 값을 Figure 5에 도시하였다.

TL/OSL 연대측정에서 시료의 절대영년은 올바른 연대를 산출하기 위해 필수요소이다. 전통적인 방식으로 제작된 옹기는 일반적으로 1100~1200℃의 온도에서 구워졌으며, 19세기말부터 제작된 납이 포함된 광명단(Pb_3O_4)이 시유된 옹기도 600~900℃ 내외에서 구워졌다고 알려져 있다(Chung *et al.*, 2002). 따라서 오송 봉산리 옹기가마 벽체시료들은 옹기 소성과정에서 고온의 열에 의해 완전히 절대영년 되었다고 판단하였다. 또한 Figure 5에서 보는 바와 모든 시료의 recuperation이 5% 이하이므로 매장기간 또는 TL/OSL 측정 과정에서의 thermal transfer, phototransfer 등의 현상이 거의 발생하지 않았다고 판단하였다(Kim, 2005). 이로부터 시료에 잔존하는 배경선량 ED_{BG} 값을 0으로 간주하였다.

흡수선량의 과소산출과 관련된 fading 현상은 열적 fading과 비정상적인 fading 현상으로 구분된다(Aitken, 1998). 이중 열적 fading은 냉광수명이 짧은 빛에서 전자가 열적으로 빠져나가 TL/OSL 신호가 감소하는 현상이다. 이와 달리 비정상적인 fading은 냉광수명이 충분히 긴 빛의 전자가 터널링 현상(tunneling effect)에 의해 재결합중심과 직접적으로 결합하는 현상으로 주로 장석과 지르콘 광물에서 발생한다고 알려져 있다. 이 연구에서는 가마벽체 시료의 비정상적인 fading 현상을 제거하기 위해 화학적으로 석영 시료만을 추출하였다. 또한 TL/OSL 연대측정에 사용된 석영 시료의 200℃ TL 피크의 경우 냉광수명은 $10^3 \sim 10^5$ 년

Figure 4. The procedures of the SAR-TL and SAR-OSL methods used in this study.

Figure 5. Recuperation and recycle ratio obtained from SAR-TL and SAR-OSL methods.

Table 1. Paleodose measured from the sample of the earthenware kiln

Sample code	Feature	Effective aliquot	MDD (mGy)	ED _{burial} (mGy)	ED _{BG} (mGy)	f	C	Paleodose (mGy, 1 σ SE)
OSK1	No.6 Kiln 1	6	90	435 $\pm$ 25	0	1	1.01 $\pm$ 0.06	432 $\pm$ 36
OSK2	No.6 Kiln 2	10	7	439 $\pm$ 10	0	1	0.99 $\pm$ 0.01	443 $\pm$ 11
OSK3	No.1 Kiln	4	4	135 $\pm$ 11	0	1	0.81 $\pm$ 0.01	166 $\pm$ 13
OSK4	No.2 Kiln 1	5	9	136 $\pm$ 26	0	1	0.71 $\pm$ 0.01	191 $\pm$ 37
OSK5	No.2 Kiln 2	6	3	111 $\pm$ 26	0	1	0.74 $\pm$ 0.01	150 $\pm$ 34
OSK6	No.3 Kiln 1	10	29	244 $\pm$ 5	0	1	1.02 $\pm$ 0.02	239 $\pm$ 7
OSK7	No.3 Kiln 2	10	33	235 $\pm$ 6	0	1	0.99 $\pm$ 0.03	238 $\pm$ 9
OSK8	No.4 Kiln 1	2	12	23 $\pm$ 1	0	1	0.62 $\pm$ 0.06	37 $\pm$ 4
OSK9	No.4 Kiln 2	0	31	<MDD	0	1	0.69 $\pm$ 0.04	<MDD

이며 OSL 신호는 안정한 325 $^{\circ}$ C TL 피크와 동일한 빛으로부터 기인한다고 알려져 있다(Wintle and Murray, 1997). 오송 봉산리 웅기가마 유적의 가마조성 및 운영시기가 최근 100년 내외라는 사실로부터 이 연구에서 산출된 흡수선량의 열적 fading 현상도 무시할 수 있다고 판단하였다.

Figure 3d에서 보는 바와 같이 가마벽체 시료에 TL/OSL 측정을 반복할 경우 민감도 변화가 발생하였다. Figure 4의 단일시료재현법에서는 매 측정마다 동일한 시험 방사선(200 mGy)으로부터 측정된 TL/OSL 신호(T_x)를 이용하며 이러한 민감도 변화를 보정한다. 또한 선량반응곡선을 만드는 마지막 과정에서 최초 실험실 방사선량(350 mGy)으로부터 얻어진 TL/OSL 세기(R_1)와 동일한 실험실 선량을 조사하여 얻어진 TL/OSL 세기(R_5)를 서로 비교(R_5/R_1)하여 민감도 보정이 제대로 이루어졌는지 평가한다(recycle ratio). 그러나 이 연구에서 적용한 SAR-TL법의 경우 급격한 민감도 증가로 인하여 민감도 보정이 제대로 이루어지지 않음을 알 수 있었다(Figure 5). 이는 흡수선량의 과대 및 과소산출의 원인이 될 수 있다. 따라서 400 $^{\circ}$ C에서 절대영년된 시료디스크를 시료당 10개씩 준비한 다음 350 mGy 베타선을 균일하게 조사한 후 동일한 SAR-TL/OSL 법을 적용하여 재현성 평가(regeneration test)를 수행하였다. 재현성 평가 결과, SAR-OSL법을 적용한 OSK1, 2(6호 웅기가마 1, 2), OSK6, 7(3호 웅기가마 1, 2) 시료에서는 모두 주어진 선량(given dose, GD)과 동일한 재현선량(regenerative dose, RD)이 산출됨을 알 수 있었다. 그러나 SAR-TL법을 적용한 OSK3(1호 웅기가마), OSK4, 5(2호 웅기가마 1, 2), OSK8, 9(4호 웅기가마 1, 2) 시료에서는 주어진 선량보다 재현선량이 낮게 산출되었다(Figure 6). 따

Figure 6. Regenerative dose measured from each 350 mGy beta irradiation using the SAR-TL/OSL method.

라서 재현선량과 주어진 선량의 비(RD/GD)를 이용하여 흡수선량의 과대산출 보정인자 C를 결정하였다(Woda *et al.*, 2012).

이 연구에서 산출된 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량 ED_{burial}, 배경선량 ED_{BG}, fading 보정인자 f, 흡수선량의 과대산출 보정인자 C를 식 (1)에 대입하여 최종적으로 오송 봉산리 웅기가마 시료의 고고선량을 산출하였고, 이를 Table 1에 정리하였다. 이중 OSK9(4호 웅기가마 2) 시료의 경우 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량이 최소 검출선량보다 낮아 고고선량을 산출할 수 없었다.

3.3. 연간선량을

TL/OSL 연대측정에서 연간선량은 고고선량과 함께 연대를 결정하기 위한 필수 요소이다. 연간선량을 산출을 위해 토기, 기와 등의 경우 시료와 시료 주변토양을 이용하

Table 2. Annual dose rate measured from the sample of the earthenware kiln

Sample code	Feature	Beta dose rate (mGy/yr)	Gamma dose rate (mGy/yr)	Cosmic ray (mGy/yr)	Annual dose rate (mGy/yr, 1 σ SE)
OSK1	No.6 Kiln 1	2.71 $\pm$ 0.05	1.67 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	3.77 $\pm$ 0.14
OSK2	No.6 Kiln 2	2.58 $\pm$ 0.05	1.68 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	3.68 $\pm$ 0.14
OSK3	No.1 Kiln	3.54 $\pm$ 0.06	1.87 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	4.59 $\pm$ 0.17
OSK4	No.2 Kiln 1	3.13 $\pm$ 0.06	1.74 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	4.16 $\pm$ 0.15
OSK5	No.2 Kiln 2	3.83 $\pm$ 0.07	1.92 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	4.86 $\pm$ 0.18
OSK6	No.3 Kiln 1	2.54 $\pm$ 0.05	1.69 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	3.65 $\pm$ 0.13
OSK7	No.3 Kiln 2	3.67 $\pm$ 0.07	1.91 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.01	4.73 $\pm$ 0.18
OSK8	No.4 Kiln 1	0.62 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.01	0.18 $\pm$ 0.01	0.92 $\pm$ 0.04
OSK9	No.4 Kiln 2	0.62 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.01	0.18 $\pm$ 0.01	0.91 $\pm$ 0.03

Figure 7. Specific activities of natural radionuclides in the earthenware kiln sample measured from gamma ray spectroscopy.

며, 가마벽체, 퇴적층, 구석기 문화층 등의 경우 시료 자체를 이용한다(Aitken, 1985).

이 연구에서는 오송 봉산리 웅기가마 유적에서 채취된 가마벽체 시료에 대해 감마선 핵종분석을 수행하여 자연방사성핵종 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 의 비방사능(Bq/kg)을 측정하였다. 감마선 핵종분석 결과, Figure 7에서 보는 바와 같이 4호 웅기가마 점토벽돌의 비방사능 값이 나머지 진흙벽체 및 흙벽돌 시료에 비해 모두 10배 정도 낮은 값으로 산출되었다. 이를 인근의 오송 만수리 유적에서 분석된 자연방사성핵종의 비방사능 값(Kim *et al.*, 2007) 및 전국 구석기 유적에서 산출된 연간선량률 값(Kim, 2010)과 비교해 보았을 때, 4호 웅기가마에 사용된 점토벽돌은 국내에서 제작된 벽돌이 아닌 수입벽돌로 추정되었다.

가마벽체 시료의 연간선량률 중 베타선량률과 감마선량

률은 측정된 각 자연방사성핵종의 비방사능 값에 변환인자(Liritzis *et al.*, 2013)를 대입하여 계산되었으며, 우주선량률은 토양의 밀도를 1.85 g/cm^3 으로 가정한 후 표토로부터 시료까지의 깊이를 Prescott and Hutton의 공식에 대입하여 산출하였다(Prescott and Hutton, 1994). 하지만 알파입자에 의한 연간선량률은 실험실에서 석영을 불산으로 한 시간 정도 처리하여 표층을 약 $10 \mu\text{m}$ 정도 식각시켰기 때문에 고려하지 않았다. Table 2에 정리된 오송 봉산리 웅기가마 벽체시료의 연간선량률은 불산의 식각으로 인한 베타선량률의 손실과 시료의 수분 함량에 대한 보정을 통하여 최종적으로 결정되었다(Zimmerman, 1971).

3.4. TL/OSL 연대

TL/OSL 연대측정에서 연대는 식(2)과 같이 가마벽체 시료를 TL/OSL 측정하여 산출되는 고고선량과 시료에 포함된 자연방사성핵종으로부터 산출되는 연간선량률의 비로 결정되며, 오차는 일반적으로 1σ 표준오차로 표현된다.

$$TL/OSL \text{ 연대 (yr)} = \frac{\text{고고선량 (mGy)}}{\text{연간선량률 (mGy/yr)}} \quad \text{식 (2)}$$

오송 봉산리 웅기가마 벽체시료의 고고선량은 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량 ED_{burial} , 배경선량 ED_{BG} , fading 보정인자 f , 과대산출 보정인자 C 를 식 (1)에 대입하여 산출되었으며(Table 1), 연간선량률은 감마선 분광분석을 통해 산출된 시료의 자연방사성핵종 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 의 비방사능(Bq/kg) 값을 변환인자로 환산하여 계산되었다

Table 3. Absolute ages measured from the earthenware kilns in Bongsan-ri archaeological site

Cultural stage	Feature	TL/OSL dating		Radiocarbon dating			Summed age (yr AD, 1σ SE)	Modelled age (yr AD, 1σ SE)
		Sample code	Age (yr AD, 1σ SE)	Sample code	Beta (pMC)	CAL (pMC)		
I	No.5 Kiln			Beta-490131	98.64±0.37		1908±24	1910±23
				CAL-5-1		98.42±0.39		
				CAL-5-2		98.65±0.38		
	No.6 Kiln	OSK1	1903±10	Beta-490132	98.76±0.37		1911±22	
				CAL-6-1		97.74±0.38		
		OSK2	1898±5	CAL-6-2		98.29±0.37		
II	No.1 Kiln	OSK3	1981±3				1980±4	1970±10
	No.2 Kiln	OSK4	1971±9	Beta-490129	132.99±0.50		1974±8	
		OSK5	1986±7					
	No.3 Kiln	OSK6	1953±3				1960±8	
		OSK7	1968±3					
	III	No.4 Kiln	OSK8	1976±5	Beta-490130	115.39±0.43		
OSK9			>1980					

(Table 2). 그러나 OSK9(4호 옹기가마 2) 시료의 경우 매장 기간 동안 시료에 축적된 흡수선량이 최소검출선량보다 작아 1980년 이후에 폐기된 가마로 추정하였다. 이 연구에서 얻어진 오송 봉산리 옹기가마 벽체시료의 TL/OSL 연대를 Table 3에 정리하였으며, 이들 TL/OSL 연대는 각 옹기가마 최종 사용시점을 의미하므로 유적 내 옹기가마의 사용 및 폐기시점과 연관하여 해석 가능하다.

4. 고 찰

이 연구에서는 오송 봉산리 옹기가마 유적에서 채취한 가마벽체 시료를 대상으로 TL/OSL 연대측정을 수행하였다. 또한 동일한 옹기가마에서 채취한 목탄 시료를 대상으로 방사성탄소 연대측정도 진행하였다. TL/OSL 연대측정 결과, 오송 봉산리 옹기가마 유적과 같은 근·현대 고고유적에서 채취된 시료의 고고선량 산출을 위해서는 SAR-TL/OSL법을 이용하여 매장기간 동안 시료에 축적된 흡수선량(ED_{burial})을 산출하는 것과 동시에 배경선량(ED_{BG}), fading 보정인자(f), 과대산출 보정인자(C)를 결정하는 것이 매우 중요함을 알 수 있었다. 특히 옹기가마 벽체와 같이 고온에서 절대영년된 시료의 경우 과대산출 보정인자(C)는 정확한 고고선량을 산출하는데 필수적인 요소였다. 또한 TL/OSL 연대측정으로 산출가능한 각 시료의 연대 하한은 최소검출선량로부터 추정 가능하였다. 이와 함께 시료의

자연방사능핵종 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 을 분석하여 산출된 비방사능 값으로부터 연간선량율과 함께 4호 옹기가마 축조에 사용된 점토벽돌의 원산지를 추정할 수 있었다. 이는 근·현대 옹기가마의 축조기법 및 축조기술 발달과 관련된 중요한 정보로 판단된다. Table 3에서 보는 바와 같이 3호 옹기가마에서 채취된 벽체시료의 TL/OSL은 다른 옹기가마와 달리 오차범위 내에서 서로 일치하지 않았다. 이는 3호 옹기가마를 이용한 옹기 생산이 장시간 동안 지속되었기 때문으로 추정된다. 방사성탄소 연대측정 결과, 5호와 6호 옹기가마에서 채취된 목탄 시료의 연대는 1950년 이전으로 산출되었으나 연대 범위는 약 300년 정도로 매우 컸다. 또한 2호와 4호 옹기가마의 연대는 1950년 이후로 산출되었으나 밤 피크 전후로 항상 2개의 역연대가 산출되어 각 연대 오차가 ±1.6년 이내(Spalding *et al.*, 2005)임에도 불구하고 옹기가마의 정확한 사용시점을 결정할 수 없었다(Figure 1). 따라서 오송 봉산리 옹기가마 유적과 같은 근·현대 고고유적의 절대연대 편년을 위해 방사성탄소 연대측정만을 수행하는 것은 적절치 않으며, 이 연구에서와 같이 TL/OSL 연대측정과 방사성탄소 연대측정을 함께 수행하여 유적 내 옹기가마의 사용 및 폐기시점을 종합적으로 추론하는 것이 타당하다고 판단되었다.

이 연구에서는 오송 봉산리 옹기가마 유적 내 각 옹기가마의 사용 및 폐기시점을 결정하기 위해 OxCal 프로그램(ver. 4.3)(Bronk Ramsey, 2009)의 Sum 명령어를 이용하여

Figure 8. Absolute chronology of the earthenware kilns in Bongsan-ri archaeological site.

각 웅기가마의 TL/OSL 연대와 방사성탄소 연대를 우선 결합하였다. 그 결과 5호 웅기가마와 6호 웅기가마의 결합연대(summed age)는 오차범위 내에서 서로 일치하여 동일시기에 사용 및 폐기된 가마로 추론되었다. 또한 1호, 2호, 3호 웅기가마들은 1960년대부터 1980년대까지 순차적으로 사용 및 폐기되었을 가능성이 높았으며, 4호 웅기가마는 결합연대와 최소검출선량을 근거로 1980년대 후반부터 최근까지 사용되었을 것으로 판단되었다. 오송 봉산리 웅기가마 유적에서는 웅기가마의 중복현상 및 구조, 출토유물 등을 근거로 가마조성 및 운영시기를 I 단계(5호, 6호 웅기가마) → II 단계(1호, 2호, 3호 웅기가마) → III 단계(4호 웅기가마)로 세분하였다(Institute of Korean Prehistory,

2018). 이에 근거하여 베이지안 통계분석(Kim *et al.*, 2005)을 수행한 결과, 전체일치지수(overall agreement index) $A_{\text{overall}}=64.1\% (>A_c=60\%)$ 로 산출되었다. 이는 유적 내 웅기가마의 사용 및 폐기시점을 I → II → III 단계로 세분하는 것이 통계적으로 유의미함을 뜻한다. 따라서 가장 이른 시기인 I 단계 웅기가마들의 사용 및 폐기시점을 1910 ± 23 년, II 단계를 1970 ± 10 년, III 단계를 1987 ± 4 년으로 각각 절대연대 편년하였다. 이는 오송 봉산리 웅기가마 유적에 대한 고고학적 편년관과도 정확히 일치한다. 최종적으로 오송 봉산리 웅기가마 유적의 베이지안 통계분석 결과를 Figure 8과 Table 3에 종합적으로 정리하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 19세기 말부터 20세기 후반까지 사용된 것으로 알려진 오송 봉산리 웅기가마 유적에서 채취된 가마벽체와 목탄 시료를 대상으로 TL/OSL 연대측정과 방사성탄소 연대측정을 수행하였다. 각 웅기가마의 TL/OSL 연대와 방사성탄소 연대를 비교 검토한 결과, 이 유적과 같은 근·현대 고고유적의 절대연대 편년을 위해서는 TL/OSL 연대측정과 방사성탄소 연대측정을 함께 수행하여 결합연대를 산출하는 것이 타당하다고 판단되었다. 오송 봉산리 웅기가마 유적의 조성 및 운영시기가 I 단계(5호, 6호 웅기가마) → II 단계(1호, 2호, 3호 웅기가마) → III 단계(4호 웅기가마)로 변천된다는 사실에 근거하여 베이지안 통계분석을 수행한 결과, 가장 이른 시기인 I 단계 웅기가마들의 사용 및 폐기시점은 1910 ± 23 년, II 단계는 1970 ± 10 년, III 단계는 1987 ± 4 년으로 각각 절대연대 편년되었으며, 이는 고고학적 편년관과도 정확히 일치하였다. 이 연구에서 산출된 오송 봉산리 웅기가마 유적의 절대연대 편년은 웅기가마의 변천과정에 대한 연구뿐만 아니라 1950년을 전후한 근·현대 고고유적에 대한 새로운 절대연대측정 방법론 설정에 기여하리라 예상된다.

사 사

이 연구는 (재)한국선사문화연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 발굴현장에서 시료 채취 및 고고학적 조언을 해주신 (재)한국선사문화연구원 연구원분들께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

- Aitken, M.J., 1985, Thermoluminescence dating. Academic Press. Cambridge.
- Aitken, M.J., 1998, An introduction to optical dating. Oxford University Press. Oxford.
- Botter-Jenson, L., Bulur, E., Duller, G.A.T. and Murray, A.S., 2003, Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. *Radiation Measurements*, 37, 535-541.
- Bronk Ramsey, C., 2009, Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51, 337-360.
- Chung, D.C., Ryu, C.Y., Hong, H.S. and Youn, Y.H., 2002, Our ethnic scientific crafts. Minsokwon. Seoul. (in Korean)
- Fleming, S.J., 1970, Thermoluminescent dating: Refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry*, 12, 133-147.
- Hong, D.G., Kim, M.J., Choi, J.H., El-Faramawy, N.A. and Goksu, H.Y., 2006, Equivalent dose determination of single aliquot regenerative-dose(SAR) protocol using thermoluminescence on heated quartz. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 243, 174-178.
- Hua, Q., Barbetti, M. and Rakowski, A.Z., 2013, Atmospheric radiocarbon for the period 1950-2010. *Radiocarbon*, 55, 2059-2072.
- Institute of Korean Prehistory, 2018, Brief excavation report of the earthenware in Bongsan-ri site in Osong No.2. Life Science Complex, Cheongju. (in Korean)
- Kim, G.D., Eum, C.H. and Bang, J.H., 2007, Dose rate conversion factor for soil by the beta-rays and gamma-rays from ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K . *Analytical Science and Technology*, 20, 460-467. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.J., Lee, S.J., Park, S.B. and Hong, D.G., 2005, Investigation for radiocarbon dates of Karak-dong assemblage of the early Bronze age in central region of Korea, using Bayesian statistical methods. *Journal of Korean Ancient Historical Society*, 47, 37-57. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.J., 2005, Optically stimulated luminescence dating using single aliquot regeneration method of single sand-sized grains from archaeological materials. *Geumgang Archaeology*, 2, 153-170. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.J., 2010, Physical characteristics of POSL and age determination for quartz from Korean paleosol. Ph. D. dissertation, Kangwon National University, Chuncheon, 97-111. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.J., 2011, Absolute dating methods. *Journal of Korean Archaeology*, 194-207. (in Korean)
- Kim, M.J., Yang, H.J. and Hong, D.G., 2011, OSL age determination of the hearths in a Bronze age dwelling site by using bayesian statistics. *Journal of Radiation Protection and Research*, 36, 52-58. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.J., Kim, S.Y., Lee, J.I., Kim, J.L., Chang, I. and Hong, D.G., 2013, Environmental gamma-ray dose rate measurement by using ultra-high sensitive LiF:Mg,Cu,Si TLD. *Radiation Measurements*, 56, 248-251.
- Liritzis, I., Stamoulis, K., Papachristodoulou, C. and Ioannides, K., 2013, A re-evaluation of radiation dose-rate conversion factors. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 13, 1-15.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2003, The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 37, 377-381.
- Prescott, J.R. and Hutton, J.T., 1994, Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, 23, 497-500.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatt, C., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M. and van der Plicht, J., 2013, IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55, 1869-1887.
- Spalding, K.L., Buchholz, B.A., Bergman, L.E., Druid, H. and Frisén, J., 2005, Forensics: Age written in teeth by nuclear tests. *Nature*, 437, 333.
- Spooner, N.A., Aitken, M.J., Smith, B.W., Franks, M. and McElroy, C., 1990, Archaeological dating by infrared stimulated luminescence using a diode array. *Radiation Protection Dosimetry*, 34, 83-86.

- Wintle, A.G. and Murray, A.S., 1997, The relationship between quartz thermoluminescence, photo-transferred thermoluminescence, and optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 27, 611-624.
- Woda, C., Ulanovsky, A., Bougrov, N.G., Fiedler, I., Degteva, M.O. and Jacob, P., 2011, Potential and limitations of the 210°C TL peak in quartz for retrospective dosimetry. *Radiation Measurements*, 46, 485-493.
- Woda, C., Fiedler, I., Urso, L. and Kaiser, J.C., 2012, Retrospective dosimetry for the population in emergency situations. Bundesamt für Strahlenschutz(BfS).
- Zimmerman, D.W., 1971, Thermoluminescent dating using fine grains from pottery. *Archeometry*, 13, 29-52.
-