Printed in the Republic of Korea
ANALYTICAL SCIENCE
& TECHNOLOGY
Vol. 25, No. 5, 324-332, 2012
http://dx.doi.org/10.5806/AST.2012.25.5.324

Evaluation of construction era of Pungnabtoseong earthen wall, Seoul by using OSL dating

Myung-Jin Kim★
Center for Applied Radiation Research, Neosiskorea Co., Ltd. Daejeon 305-380, Korea
(Received July 22, 2012; Revised August 16, 2012; Accepted August 16, 2012)

OSL 연대측정을 통한 풍납토성 축조연대 산출

김 명 진★
㈜네오시스코리아 방사선응용연구센터
(2012. 7. 22. 접수, 2012. 8. 16. 수정, 2012. 8. 16. 승인)

Abstract: Construction era of Pungnabtoseong earthen wall is one of the most popular controversial issues in Korean archaeological research. For the evaluation of construction era, OSL dating was carried out using seven pottery pieces collected in each construction stage. From TL/OSL characteristics, and the results of absolute zeroing test and recovery test, it was proved that the pottery samples were completely bleached. The reliable paleodose was evaluated by using the SAR method with preheat at 220 ºC, and the pottery OSL age was determined from the ratio of paleodose to annual dose rate. Considering the resultant OSL ages, archaeological context and the related 14C ages, the first construction era was determined as 294±52 yrs AD (1σ SE). Also we found that the enlargement of construction stage III was 328±30 yrs AD (1σ SE) and final construction was finished within 400±76 yrs AD (1σ SE). Therefore, it is suggested that the construction of Pungnabtoseong earthen wall was firstly started in the late 3rd century AD and several enlargements and repairs had been carried out, before the transfer of the capital of Baekje dynasty to Woongjin (Gongju) at 475 AD.

요 약: 백제 한성기의 왕성으로 알려진 풍납토성의 축조연대는 고고학 분야의 대표적인 논쟁사항 중 하나이다. 이 연구에서는 풍납토성의 축조연대 편년을 위해 7 개의 토기 시료에 대하여 OSL 연대측정을 수행하였다. 연대측정에 앞서 TL/OSL 신호 관찰 및 절대영년도 평가, 재현성 평가를 수행한 결과, 풍납토성 토기 시료는 절대영년이 완벽히 이루어졌으며 고고선량은 220 ºC 열전처리 온도의 단일시료재현법으로부터 신뢰도 높은 값이 산출되었다. 산출된 고고선량을 연간선량율로 나누어 풍납토성 토기 시료의 OSL 연대를 결정하였다. 풍납토성의 축조연대 편년을 위해 각 토기 시료의 OSL 연대와 고고학적 맥락, 14C 연대 등을 종합하여 판단한 결과, 풍납토성의 초축시점을 294±52 yrs AD (1σ SE), 제 III 단계 증축을 328±30 yrs AD (1σ SE), 최종성벽의 완성을 400±76 yrs AD (1σ SE)로 비정하였다. 따라서 풍납토성은 서기 3세기 후반에 초축된 이후 475년 백제의 웅진천도 이전까지 여러 번의 증축 및 개축이 이루어졌음을 알 수 있었다.

Key words: pungnabtoseong earthen wall, construction era, OSL dating, pottery

★ Corresponding author
Phone : +82-(0)42-489-6541 Fax : +82-(0)42-489-6534
E-mail : mjkim@neosiskorea.com

1. 서 론

풍납토성(風納土城, 사적 제11호)은 백제 한성기(百濟 漢城期, BC 18년~AD 475년)의 왕성으로 알려져 왔으나, 그 축조시점에 대한 고고학적 견해는 현재 두 가지로 나뉜다. 첫번째 견해는 성벽절개지점의 축토층 혼입토기 가운데 심발형토기(深鉢形土器)와 장란형토기(長卵形土器), 대옹(大甕) 등의 존재와 이와 공반되는 서진대(西晉代)의 회유도기(灰釉陶器), 백제토기의 출현 등에 기초하여 AD 3세기 중후엽으로 편년하는 견해이며,[1] 두번째 견해는 성벽의 구조와 출토유물, 그리고 성벽 내에서 채취한 시료에 대한 절대연대, 토성 내부 유구와의 관계 등으로부터 BC 1세기대에서 AD 2세기에 걸쳐 초축되었을 가능성이 있으며, 늦어도 AD 3세기를 전후한 시기에는 현재와 같은 모습으로 완성되었을 가능성이 매우 높다는 견해이다.[2] 이와 같이 동일한 발굴결과 및 유물상에 대한 고고학적 해석의 차이로부터 발생하는 풍납토성 축조시점에 대한 이견은 층서관계와 출토위치가 명확하고 주변환경이 안정적인 시료들의 절대연대측정을 통해 해결될 수 있다.

일반적으로 풍납토성과 같이 판축기법(版築機法)에 의해 축조된 성벽 내부에는 토양채취시 및 축토과정에서 혼입된 토기, 기와, 나무, 숯, 씨앗 등의 다양한 무・유기질 물질이 포함되어 있으므로 이들을 대상으로 냉광 연대측정(luminescence dating)과 방사성탄소 연대측정(14C dating) 등이 적용 가능하다. 이 중 냉광 연대측정법은 석영과 장석, 방해석 등의 무기광물을 함유하고 있는 시료에 적합하며, 연대는 식 (1)과 같이 시료로부터 열발광(thermoluminescence, TL) 및 광자극 냉광(optically stimulated luminescence, OSL)을 측정하여 산출되는 고고선량(paleodose)과 시료와 시료 주변토양에 포함된 ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K 등의 방사성동위원소를 각각 측정하여 산출되는 베타선량율과 감마선량율, 그리고 우주선량율의 합인 연간선량율(annual dose rate)의 비로 결정된다.[3]

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

냉광 연대측정법 중 OSL 신호를 이용한 연대측정은 열 뿐만 아니라 빛에 의해 절대영년(absolute zeroing)이 이루어진 시료에 대해서도 적용 가능하므로 풍납토성과 관계된 토기, 기와, 판축토양 등에 특히 유용하다. 이와 함께 산출된 OSL 연대는 대상 시료인 유물 및 유구 자체의 제작과 사용, 폐기와 관련된 시점을 직접적으로 지시하므로,[4-6] 이들과 공반 관계에 있는 나무와 숯 등으로부터 얻어지는 14C 연대보다 풍납토성의 축조시점을 결정하는데 보다 효과적이다.

이 연구에서는 풍납토성 축조연대 산출을 위하여 판축토 내부에서 채취한 토기 시료를 대상으로 OSL 연대측정을 수행하였다. 이를 위해 토기 시료에서 측정되는 OSL 신호의 물리적 특성과 절대영년도를 우선 평가하였으며, 이를 바탕으로 각 축조단계에 해당되는 토기 시료의 OSL 연대를 산출하였다. 이후 고고학적 맥락 및 동일한 축조단계에서 분석된 14C 연대측정 결과와 상호비교하여 최종적으로 풍납토성의 축조시점을 추론하였다.

2. 시료 및 실험기기

2.1. 시료

한강 유역에 위치한 풍납토성은 고구려의 침입(AD 475년)으로 인한 웅진 천도 이전까지 백제 한성기의 왕성이었으며, 주변엔 몽촌토성(夢村土城)과 석촌동고분군(石村洞古墳群) 등과 같은 많은 관련 유적들이 존재한다. 판축기법에 의해 축조된 풍납토성의 둘레는 약 4 km 정도였으나 1900년대 초에 홍수로 소실되어 현재 약 2.7 km만이 남아 있다. 풍납토성의 성격 및 축조시점을 밝히기 위한 성벽 발굴조사는 1997년 이래 현재까지 계속되어지고 있으며, 이 연구에서는 2011년에 발굴조사된 동성벽 표준단면의 각 축조단계에서 OSL 연대측정을 위해 총 9 개의 토기편을 시료로 채취하였다.[7] 이를 세부적으로 보면 가장 이른 시기에 해당하는 제 I 단계 구지표면에서 2 개(NCH-PN1-P1과 P2), 제 I 단계 성토층에서 1 개(NCH-PN2-P1), 제 II 단계 초축성벽에서 2 개(NCH-PN3-P1과 P2), 제 III 단계 증축성벽에서 2 개(NCH-PN4-P1과 P2), 제 IV 단계 최종성벽에서 2 개(NCH-PN5-P1과 P2)의 토기편을 각각 채취하였으며, *Fig*. 1의 사진에 이들 토기편에 대한 외형 및 문양을 제시하였다. 이 중 NCH-PN4-P1 토기편의 표면에는 다른 토기편들과 달리 광물질 안료 또는 유약처럼 보이는 이물질이 부착되어 있었다.

OSL 연대측정을 위한 시료를 채취할 때는 시료가 빛에 노출되지 않도록 주의해야 한다. 토기의 경우 시료 채취시 빛을 차단하기 어렵고 수분의 증발이 빠르게 이루어지므로 이 연구에서는 축토환경이 안정된 판축토층 내부에 포함된 토기편을 주변토양과 함께

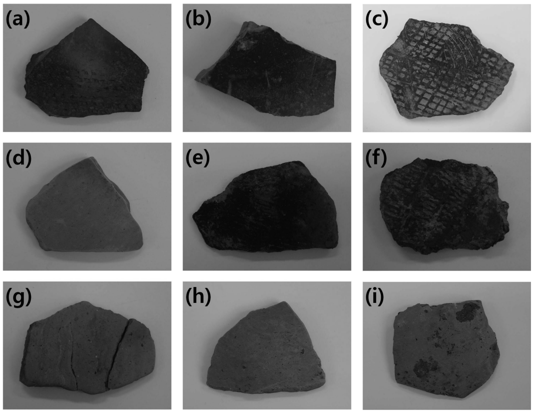

Fig. 1. Photograph of pottery pieces collected in Pungnabtoseong earthen wall for OSL dating: NCH-PN1-P1 (a), NCH-PN1-P2 (b), NCH-PN2-P1 (c), NCH-PN3-P1 (d), NCH-PN3-P2 (e), NCH-PN4-P1 (f), NCH-PN4-P2 (g), NCH-PN5-P1 (h) and NCH-PN5-P2 (i).

채취하여 알루미늄 호일을 이용해 밀봉하였다. 이 후 암실로 운반하여 빛에 노출된 토기편의 표면을 약 2 mm 정도 제거하고 빛에 노출되지 않은 부분만을 이용하여 고고선량 측정에 필요한 석영을 추출하였다. 이와 함께 연간선량율 산출을 위해 토기편에서 제거된 부분(빛에 노출된 부분) 및 토기편과 함께 채취된 주변토양을 사용하였다.

고고선량 측정에 필요한 석영은 다음과 같은 화학처리로 얻어졌다.[8] 먼저 마노유발(agate-mortar)을 이용하여 표면이 제거된 토기편을 잘게 부순 후 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(H_2O_2)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.[9] 화학처리 완료된 풍납토성 토기 시료 중 NCH-PN3-P2와 NCH-PN5-P1 토기편에서는 충분한 양의 석영 시료가 추출되지 않았기 때문에 이를 제외한 7 개의 토기편만을 대상으로 OSL 연대측정을 수행하였다.

연간선량율 중 베타선량율 산출을 위해 토기편에서 제거된 부분을 마노유발로 약 10 μm 이하의 입자상태로 분쇄하여 동위원소 분석용 시료로 준비하였고, 감마선량율 산출을 위해 주변토양을 약 90 μm 크기의 입자상태로 분쇄하여 감마선 분광분석용 시료로 준비하였다.

2.2. 실험기기

고고선량 산출을 위한 냉광 측정은 (주)네오시스코리아 방사선응용연구센터에 설치된 Riso TL/OSL reader (Riso TL/OSL-DA-20)를 이용하여 수행하였다.[10] 여기광원으로는 470±20 nm의 파장을 가진 청색 발광 다이오드(Nichia type NSPB-500S)가 사용되었으며 광원의 세기는 50 mW/cm^2 정도이다. 또한 시료의 장석 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 ^{90}Sr/^{90}Y 베타선원으로부터 제공되며 시료가 받는 흡수선량율은 0.09 Gy/s이다.

연간선량율 중 베타선량율 산출을 위한 방사성동위원소 ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K 등의 농도 분석은 한국기초과학지원연구원에 설치된 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP/MS: PQ3 model, Thermo Elemental Ltd.)와 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP/AES: SHIMADZU ICPS-1000III)를 이용하여 수행되었고, 감마선량율 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 연대측정시 고고선량 측정 조건을 적절히 설정하기 위해 냉광 신호의 물리적 특성을 먼저 파악할 필요가 있으며, 이는 풍납토성 각 토기편에서 추출한 석영 시료에서 방출되는 TL/OSL 신호의 형태로부터 판단 가능하다. 이 중 TL 신호는 피크의 형태를 갖으며 특정한 온도에서 나타나는 TL 피크의 세기는 석영 내 불순물 덫의 종류와 물리적 특성에 관계된다. 특히 여기광원의 세기를 일정하게 유지하며 측정하는 CW-OSL (continuous-wave OSL) 신호는 고고선량 산출과 직접적으로 연관되며 시간이 지남에 따라 지수적으로 감소된다. 일반적으로 CW-OSL 신호는 fast, medium,

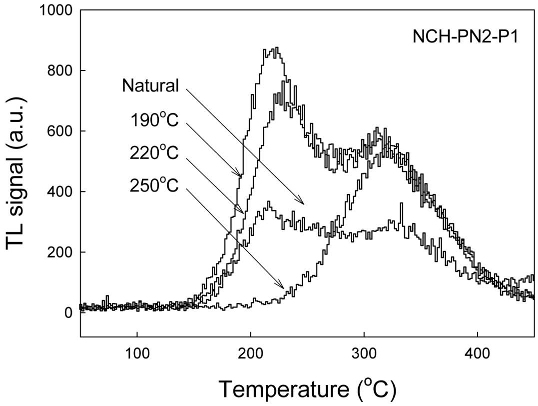

Fig. 2. Comparison between natural TL glow curve and artificial TL glow curve thermally treated at each temperature.

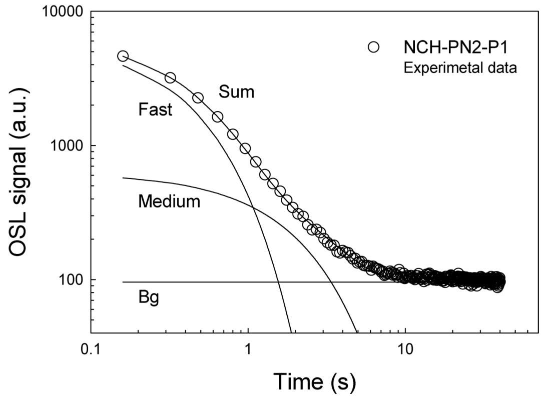

Fig. 3. Physical characteristics obtained from the deconvolution of CW-OSL decay curve.

slow 성분의 광이온화 단면적(photoionization cross-section)을 갖는 불순물 덫에서 기인하는 OSL 신호의 선형조합으로 해석된다.[11] 따라서 이들 TL/OSL 신호를 통해 시료의 열전처리(preheat) 온도 및 고고선량 산출과 관계된 OSL 신호의 특성 등에 대한 정보를 사전에 얻을 수 있다.

Fig. 2는 풍납토성 토기편에서 추출한 석영 시료의 자연 TL 신호와 각 온도에서 열전처리한 후 측정한 실험실 방사선이 조사된 TL 신호를 비교한 예이다. 자연 TL 신호는 230 ºC와 320 ºC 부근에서 피크가 나타났으며, 수명(lifetime)이 상대적으로 짧은 230 ºC TL 피크의 세기가 320 ºC 피크보다 약간 강함을 알 수 있었다. 10 Gy의 베타선이 조사된 석영 시료를 이용하여 각각 190 ºC, 220 ºC, 250 ºC에서 열전처리 후 TL 신호를 측정한 결과 열전처리 온도가 증가함에 따라 230 ºC TL 피크의 세기가 감소하다가 250 ºC 열전처리시 완전히 사라짐을 알 수 있었다. 또한 250 ºC 열전처리에서 320 ºC 부근의 피크가 열적감쇠(thermal decay) 하는 현상도 관찰되었다. 따라서 220 ºC 열전처리 후 측정한 TL 신호의 형태가 자연 TL 신호와 유사하다는 사실과 고고선량 측정에서 시료에 실험실 방사선 조사시 불안정한 덫(110 ºC TL 피크)에 전자가 포획되는 현상을 방지하고 매장기간 동안 자연 시료에서 발생할 수 있는 열적전환(thermal transfer) 등을 고려하면 220 ºC 부근에서 열전처리가 이루어져야 함을 알 수 있었다.

풍납토성 토기편에서 얻어진 각 석영 시료로부터 측정된 자연 CW-OSL 신호를 광이온화 단면적의 크기에 따른 선형조합으로 분해한 후, 그 대표적인 예를 *Fig*. 3에 제시하였다. *Fig*. 3에서 보는 바와 같이, 자연 CW-OSL 신호는 fast 성분과 medium 성분, 배경신호의 선형조합으로 이루어졌고, 특히 광이온화 단면적이 매우 큰 fast 성분이 최초 OSL 신호의 85% 이상을 차지하였다. 따라서 풍납토성 토기편 석영 시료는 열뿐만 아니라 빛에도 매우 민감하며, OSL 측정 및 광표백(optical bleaching) 시 약 2초 이내에 대부분의 OSL 신호가 방출되고 5초 이내에는 완전히 방출되어 OSL 측정을 통한 고고선량 산출에 매우 적합함을 알 수 있었다.

3.2. 절대영년도 평가

절대영년은 석영과 장석, 방해석 등의 무기광물이 열과 빛에 의해 기존의 냉광을 모두 잃는 현상을 의미하며, 일반적으로 토기는 소성 및 취사 과정에서 고온의 열에 의해 절대영년이 이루어진다. 이와 관련된 한성지역 백제토기에 대한 최근 연구성과를 살펴보면 풍납토성내 연질 및 경질의 백제토기는 대략 900~1200 ºC에서 소성되었고,[12] 또한 동일한 시기의 심발형토기를 이용한 음식물 조리 실험 결과 300 ºC 부근의 온도에서부터 많은 음식물 조리가 이루어졌음을 알 수 있었다.[13] 이는 토기의 제작과 사용, 폐기의 전 과정을 모두 고려했을 때, 풍납토성에서 채취한 토기편의 CW-OSL 신호가 300 ºC 부근에서 완전히 사라지지 않는다면 정확한 OSL 연대를 산출할 수 없음을 의미한다.

이를 확인하기 위하여 토기편에서 추출한 각 석영 시료의 일부를 솔라 시뮬레이터(SOL2: Honle/500S, UV technology)를 사용하여 완전히 절대영년 시킨 후 6 Gy의 베타선을 균일하게 조사하였다. 열에 의한

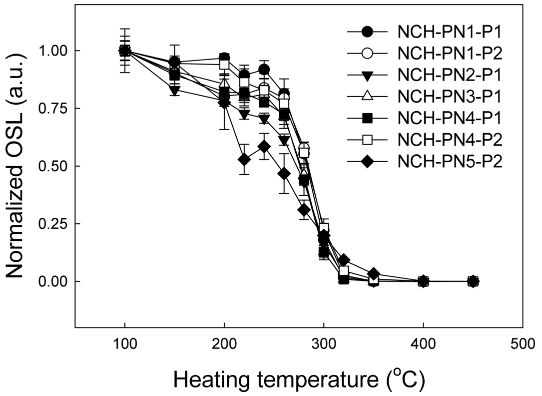

Fig. 4. Determination of the minimum thermal zeroing temperature.

Table 1. Sequence of SAR[a)] method

Step	Sequence	OSL intensity[c)]
1	Preheating at T °C[b)] 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) SAR is the abbreviation of single aliquot regenerative dose method.
b) For plateau test, five preheat temperatures, T °C, varied from 200 °C to 280 °C with 20 °C intervals were used.
c) 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.

CW-OSL 신호의 감소를 관찰하기 위하여 *Fig*. 4에서와 같이 상온에서부터 450 °C 사이의 각 온도에서 측정에 이용할 시료 디스크(aliquot)를 각각 2 개씩 준비하였으며, 열표백(thermal bleaching)은 각 온도에 도달 후 10초 간 유지하는 방식으로 수행하였다. 열표백 후 측정된 각 시료 디스크의 OSL 신호 세기는 시료 디스크 간의 질량차로 인해 규격화가 필요하므로 소량의 시험 방사선(test dose)을 각 시료 디스크에 동일하게 다시 조사한 후 측정된 OSL 신호의 차이를 이용하여 이를 보정하였다.

열표백으로 인한 CW-OSL 신호의 감소는 각각 2 개씩의 시료 디스크를 평균하여 산출되었으며, *Fig*. 4에서 보는 바와 같이 열표백 온도가 증가함에 따라 OSL 신호는 점차로 감소하다가 260 °C를 전후하여 급격히 감소하고 320 °C 이후에서는 완전히 소멸됨을 알 수 있었다. 따라서 풍납토성 및 동 시기의 유적에서 출토된 대부분의 토기들이 소성 및 취사 과정에서 일반적으로 300 °C 이상의 높은 열을 경험한다는 사실로부터 OSL 연대측정을 위한 풍납토성 토기 시료는 완벽히 절대영년 되었다고 판단하였다.

3.3. 재현성 평가

매장기간 동안 시료에 축적된 고고선량의 산출은 현재 단일시료재현법(single aliquot regenerative dose method)을 이용하여 주로 수행되어지고 있으며,[14] 이 경우 석영 시료는 반복적인 실험실 방사선 조사, 열전처리, 광표백 등을 경험하게 되어 시료의 실제 고고선량과 다른 선량이 산출될 소지가 있다. 따라서 고고선량을 산출하기 앞서 임의의 실험실 방사선량을 조사한 후 시료로부터 동일한 흡수선량이 산출되는가에 대한 평가가 필요하며, 이를 재현성 평가(recovery test)라고 한다.

재현성 평가 중 열전처리에 대한 재현선량의 안정성을 확인하기 위해 플래토우 평가(plateau test)를 우선 수행하였다. 이를 위해 절대영년 된 풍납토성 토기편 석영 시료에 6 Gy의 베타선을 균일하게 조사한 후, 열전처리 온도를 200 °C부터 280 °C까지 20 °C씩 증가시키면서 단일시료재현법을 적용하여 흡수선량을 산출하였다(*Table* 1 참고). *Fig*. 5(a)에 도시된 재현선량은 각각 2 개의 시료 디스크부터 얻어진 흡수선량을 평균하여 산출되었으며, 220 °C~240 °C 사이의 열전처리 구간에서 모든 시료의 재현선량이 플래토우를 이룸을 알 수 있었다. 또한 재현선량의 편차를 고려하였을 때 220 °C 열전처리에서 가장 신뢰도 높은 값이 산출됨을 알 수 있었다.

이와 함께 다양한 범위의 방사선량에 대한 재현성을 평가하기 위해 절대영년 된 풍납토성 토기편 석영 시료에 0 Gy에서부터 12 Gy 사이의 베타선을 조사한 후, 220 °C 열전처리 온도에서 단일시료재현법을 적용하여 흡수선량을 산출하였다. *Fig*. 5(b)에서 보는 바와 같이 임의로 주어진 각 방사선량에 대하여 산출된 재현선량은 각각 3 개의 시료 디스크로부터 얻어진 흡수선량을 평균하여 결정되었으며, 12 Gy 이하의 범위에서 서로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

풍납토성 토기 시료에 대한 재현성 평가 결과, OSL 연대측정을 위한 고고선량 산출시 220 °C 열전처리 온도에서 단일시료재현법을 적용하는 것이 매우 적합하며, 이를 통해 매장기간 동안 시료에 축적된 고고선량을 매우 정확하고 정밀하게 결정할 수 있음을 알

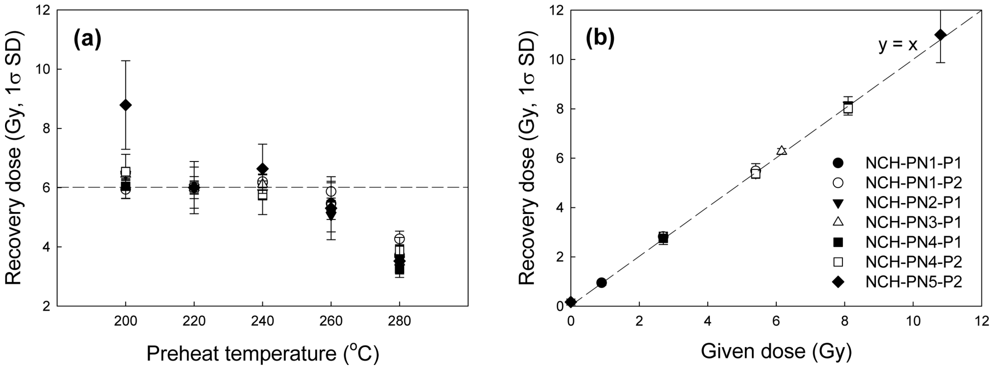

Fig. 5. Dose recovery test for SAR method. In the preheat plateau test, the reproducibility was the most reliable at 220 °C (a), and at this temperature all recovery doses were in good agreement with the given doses (b).

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 등의 붕괴에너지에 의해 시료에 누적된 흡수선량을 의미하며, 시료의 자연 OSL 세기를 실험실 방사선 조사에 의해 얻어진 OSL 세기와 상호 비교하여 구할 수 있다.

이 연구에서는 풍납토성 토기편 석영 시료의 자연 TL 신호 특성과 재현성 평가 결과 등에 근거하여 열전처리 온도를 220 ℃로 고정한 후 *Table* 1에 제시된 단일시료재현법에 따라 각 토기편의 고고선량을 산출하였다. *Fig.* 6은 단일시료재현법을 이용하여 고고선량을 산출한 예이며, 고고선량은 실험실 방사선에 의한 OSL 세기(L_x/T_x)들을 단일 포화지수함수(single saturated exponential function)으로 곡선접합하여 만들어진 성장곡선에 자연 OSL 세기(L_n/T_n)을 내삽하여 산출되었다. 또한 반복된 동일 실험실 선량에 대한 OSL 세기(*Fig.* 6의 "Δ")를 중첩하여 단일시료재현법의 유효성을 검증하였다. 최종적으로 각 시료의 고고선량은 15 개 이내의 시료 디스크로부터 얻어진 선량들을 통계처리하여 결정되었다. 풍납토성 토기 시료에 대한 고고선량을 *Table* 3에 정리한 결과, NCH-PN4-P1을 제외한 나머지 6 개 토기편에 대한 고고선량은 상대오차가 모두 5% 미만이었으므로 이들 고고선량은 매우 정확하고 정밀하게 산출되었다고 판단하였다.

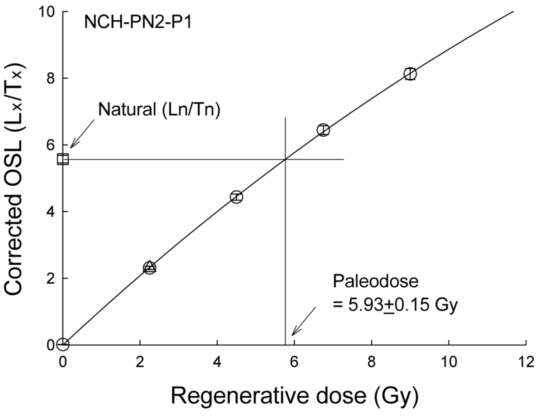

Fig. 6. An example of the evaluation of paleodose which is calculated from the interpolation of the corrected natural OSL (L_n/T_n) into SAR growth curve.

3.5. 연간선량율 산출

OSL 연대측정에서 연간선량율은 고고선량과 함께 연대를 결정하기 위한 필수 요소이다. 일반적으로 연간선량율은 시료와 시료를 중심으로 30 cm 이내에서 등방성(homogeneity)을 고려하여 채취한 주변토양을 대상으로 각각의 방사성핵종 ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K 등의 농도(mg/kg 또는 Bq/kg)를 구한 후 변환인자(conversion factor)를 사용하여 계산된다.[15,16]

이 연구에서는 연간선량율 산출을 위해 풍납토성 토기편에서 분리한 빛에 노출되었던 바깥 부분과 토기편과 함께 채취된 주변토양에 대해 ICP 원소분석과 감마선 분광분석을 각각 수행하여 방사성핵종 농도를 측정하였으며, 이를 *Table* 2에 정리하였다. 연간선량율 중 베타선량율과 감마선량율은 측정된 각 방사성핵종 농도에 변환인자를 대입하여 계산되었으며, 우주선량율은 토양의 밀도를 1.85 g/cm^{3}으로 가정한 후 성

Table 2. Natural radionuclide concentration obtained from pottery and its surrounding soil

Sample	Depth (cm)	Pottery			Surrounding soil		
		^{238}U (mg/kg)	^{232}Th (mg/kg)	^{40}K (%)	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
NCH-PN5-P2	150	3.49±0.17	15.87±0.79	1.06±0.05	51.56±2.13	85.40±1.27	802.05±5.52
NCH-PN4-P1	200	4.29±0.21	15.67±0.78	2.07±0.10	56.90±1.93	91.73±0.66	826.64±5.73
NCH-PN4-P2	250	3.75±0.18	15.40±0.77	1.66±0.08	56.90±1.93	91.73±0.66	826.64±5.73
NCH-PN3-P1	200	2.74±0.13	23.24±1.16	1.21±0.06	52.22±0.73	85.27±0.64	792.86±5.52
NCH-PN2-P1	400	3.00±0.15	14.50±0.72	1.78±0.08	46.55±1.99	81.68±0.63	796.67±5.55
NCH-PN1-P1	600	3.17±0.15	13.73±0.68	1.30±0.06	47.36±0.75	75.58±0.62	797.21±5.62
NCH-PN1-P2	600	3.06±0.15	16.12±0.80	1.56±0.07	51.85±2.32	80.58±0.64	845.14±5.98

Table 3. OSL dating results of seven pottery pieces collected from Pungnabtoseong earthen wall

Construction stage	Sample	Effective aliquot	Paleodose[a)] (Gy)	Annual dose rate[b)] (Gy/ka)	OSL age (yrs, 1σ SE)	Construction age (yrs, 1σ SE)
IV	NCH-PN5-P2	11	5.23±0.23	3.25±0.06	400±76 AD	400±76 AD
III	NCH-PN4-P1	5	6.88±0.51	4.08±0.07	325±128 AD	328±30 AD
	NCH-PN4-P2	7	6.32±0.04	3.76±0.06	328±30 AD	
II	NCH-PN3-P1	6	6.82±0.20	3.42±0.06	14±67 AD	N/A
I	NCH-PN2-P1	14	5.93±0.15	3.46±0.06	294±52 AD	294±52 AD
	NCH-PN1-P1	6	6.52±0.15	3.13±0.05	72±60 BC	
	NCH-PN1-P2	5	9.19±0.28	3.44±0.06	659±93 BC	

a) Paleodose was evaluated from quartz grain sample ranging from 90 μm~250 μm by using the SAR method[14] with preheat at 220 ºC
b) Annual dose rate consists of beta, gamma dose rate and cosmic ray component. Finally, it is corrected for water content using Zimmerman's formula[18] and beta attenuation through the grains by a factor of 0.9.

벽 표면으로부터 토기편까지의 깊이를 Prescott and Hutton의 공식에 대입하여 산출하였다.[17] 하지만 알파 입자에 의한 연간선량율은 실험실에서 석영을 불산으로 한 시간 정도 처리하여 표층을 약 10 μm 정도 에칭시켰기 때문에 고려하지 않았다. *Table* 3에 정리된 연간선량율은 불산의 에칭으로 인한 베타선량율의 손실과 시료의 수분 함량에 대한 보정을 고려하여 최종적으로 결정되었다.[18]

3.6. OSL 연대 산출

풍납토성 토기 시료의 OSL 연대는 열전처리 온도가 220 ºC로 고정된 단일시료재현법을 이용하여 산출된 고고선량과 시료 및 주변토양에 원소분석과 감마선 분광분석을 적용하여 산출된 연간선량율을 식 (1)에 대입하여 계산하였고, 오차는 1σ 표준오차로 표현하였다. 이 연구에서 얻어진 풍납토성 토기 시료의 OSL 연대를 *Table* 3에 정리하였으며, 이들 OSL 연대는 축토과정에서 토기편이 매장된 시점을 의미하므로 성벽의 축조시점과 연관하여 해석 가능하다.

4. 고 찰

OSL 연대는 시료가 토양에 매장된 이후부터 현재에 이르기까지 경과된 시간을 의미한다. 비록 풍납토성 토기 시료와 같이 시료의 절대영년이 완벽히 이루어졌을지라도 절대영년된 시점과 매장시점 간의 시간차(time-lag), 시료의 이동, 매장기간 중 주변환경의 급격한 변화 등이 발생했다면 OSL 연대의 해석 및 적용에 세심한 주의가 필요하다. 이 장에서는 풍납토성 판축토 내부에서 채취한 각 토기 시료의 OSL 연대와 고고학적 맥락, 14C 연대결과 등을 종합하여 풍납토성의 초축시점과 이후 증축단계의 연대를 순차적으로 추론하였다.

풍납토성의 초축시점은 고고학적 이견이 존재하는 매우 민감한 사항이며, 이 연구에서는 제 I 단계 구지표면에서 채취한 토기편(NCH-PN1-P1과 P2)과 제 I 단계 성토층에서 채취한 토기편(NCH-PN2-P1)의 연대와 관련되나 *Table* 3에서 보는 바와 같이 각 토기편의 연대는 서로 일치하지 않는다. 이를 ① 성벽 축조재료

인 토양을 채취하고 축토하는 과정에서 이전 시대의 유물들이 판축토 내부에 포함될 수 있고, 성벽의 축조시점은 혼입된 유물들 가운데 가장 늦은 것들의 제작・사용시점보다 올라갈 수 없다는 사실[1]과 ② 제 I 단계에 해당하는 토기편의 연대 중 NCH-PN2-P1 토기편의 OSL 연대가 가장 늦다는 점, ③ 동일한 축조단계에서 채취된 나무와 목탄의 14C 연대가 각각 1770±30 yrs BP (Beta-306898)와 1730±30 yrs BP (Beta-306903)로 산출되었다는 점[7] 등과 함께 종합적으로 검토해 볼 때, NCH-PN1-P1과 P2의 토기편들은 이미 오래전부터 토양 속에 존재하고 있었으며 성벽 축조를 위한 토양 채취과정에서 토양과 함께 채취되어 축토에 사용되었던 것으로 추정된다. 따라서 이 토기편들의 연대는 성벽의 축조시점과는 무관한 것으로 판단되며, 풍납토성의 초축시점은 NCH-PN2-P1 토기편의 OSL 연대로부터 294±52 yrs AD (1σ SE)로 비정할 수 있다.

발굴조사 결과 풍납토성 동벽에서도 여러 번의 증축 및 개축이 있었음이 확인되었으며, 이 연구에서는 제 II 단계 초축성벽에서 채취된 토기편(NCH-PN3-P1), 제 III 단계 증축성벽에서 채취한 토기편(NCH-PN4-P1과 P2), 제 IV 단계 최종성벽에서 채취한 토기편(NCH-PN5-P2)의 OSL 연대가 각 증축단계의 시기와 관련된다. 이 중 NCH-PN3-P1 토기편의 OSL 연대는 전후 축조단계의 연대와 비교해 보면 층위적 맥락(stratigraphic context)에 어긋나는 매우 이른 시기임을 알 수 있다. 따라서 이 토기편도 이전부터 토기편이 매장되어 있던 흙을 채취하여 성벽 축조시 사용하였던 것으로 추정되며 토기편의 OSL 연대도 성벽의 축조시점과는 직접적으로 관계가 없는 것으로 판단된다. 또한 NCH-PN4-P1 토기편은 광물질 안료 또는 유약처럼 보이는 이물질이 표면에 부착되어 있는 것이 시료채취 과정에서 확인되었다. 이를 ICP 원소분석한 결과 천연방사성핵종 U, Th, K의 농도는 각각 5.24±0.26 mg/kg, 18.18±0.91 mg/kg, 2.40±0.12%로 산출되었으며, 이는 *Table* 2에 정리된 토기편의 원소분석치 보다 높은 값이었다. 풍납토성 토기 시료의 경우 절대영년이 완벽히 이루어졌음에도 불구하고 이러한 이물질의 부착 및 불균질한 매장환경 등은 토기 시료의 OSL 연대 산출시 오차가 커지는 원인이 된다. 따라서 NCH-PN4-P1 시료의 OSL 연대도 제 III 단계 증축성벽의 연대를 안정적으로 반영하기 어렵다고 판단하였다. 그러므로 풍납토성 동벽내 각 증축단계의 시기는 NCH-PN4-P2 토기편과 NCH-PN5-P2 토기편의 OSL 연대로부터 비정 가능하며, 제 III 단계 증축은 328±30 yrs AD (1σ SE)에 이루어졌고 현재와 같은 최종성벽의 형태는 400±76 yrs AD (1σ SE)에 완성되었다고 추론할 수 있다.

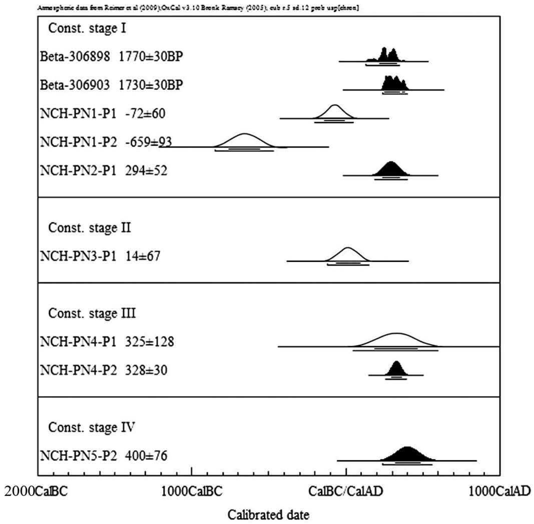

Fig. 7. Estimation of the construction era of Pungnabtoseong earthen wall from the resultant OSL dates referring to radiocarbon dates and archaeological context. The reliable age is finally shown as the black-filled graph in each construction stage.

Fig. 7은 풍납토성 토기 시료의 OSL 연대와 층위적 맥락, 관련된 14C 연대를 종합해 나타낸 그림이며, 검은색의 그래프는 *Table* 3에 정리된 풍납토성 축조시점과 관련된 유의미한 연대를 의미한다. 이와 같이 풍납토성은 서기 3세기 후반에 초축된 이후 475년 백제의 웅진천도 이전까지 여러 번의 중축 및 개축이 이루어졌음을 알 수 있었다.

5. 결 론

백제 한성기의 왕성으로 알려진 풍납토성의 축조연대는 현재에도 고고학 분야의 대표적인 논쟁사항 중 하나이다. 이 연구에서는 풍납토성의 축조연대 편년을 위해 최근 발굴조사된 동벽 표준단면의 판축토 내부에서 채취된 9 개의 토기편 중 화학처리를 통해 충분한 양의 석영 시료가 추출된 7 개의 토기편을 대상으로 OSL 연대측정을 수행하였다.

연대측정에 앞서 TL/OSL 신호 관찰 및 절대영년도 평가 결과, 풍납토성 토기 시료는 230 °C 자연 TL 피크와 fast 성분이 주를 이루는 CW-OSL 신호가 고고

선량 산출에 밀접하게 관련되며, 320 ℃ 열표백 이후에서 CW-OSL 신호가 완벽히 소멸됨으로부터 소성 및 취사과정에서 완벽히 절대영년이 이루어졌음을 알 수 있었다. 이후 재현성 평가로부터 신뢰성이 입증된 220 ℃ 열전처리 온도의 단일시료재현법을 이용하여 각 토기편의 고고선량을 산출하였고, 산출된 고고선량을 연간선량율로 나누어 풍납토성 토기 시료의 OSL 연대를 결정하였다. 풍납토성의 축조연대 편년을 위해 각 토기편의 OSL 연대와 고고학적 맥락, 14C 연대 등을 종합하여 판단한 결과, 풍납토성의 초축시점은 294±52 yrs AD (1σ SE), 제 III 단계 증축은 328±30 yrs AD (1σ SE), 최종성벽의 완성은 400±76 yrs AD (1σ SE)로 비정할 수 있었다. 따라서 풍납토성은 서기 3세기 후반에 초축된 이후 475년 백제의 웅진천도 이전까지 여러 번의 증축 및 개축이 이루어졌음을 알 수 있었다.

풍납토성은 백제 한성기 연구의 기준이 되는 매우 중요한 유적이므로 이 연구에서 산출한 풍납토성 절대연대 편년은 앞으로 풍납토성과 관련된 인근 유적의 편년 및 백제 한성기 연구, 백제토기의 편년 검증 등에 크게 기여하리라 예상된다.

감사의 글

이 연구는 국립문화재연구소의 연구비 지원(계약번호:20111003702-00)으로 수행되었습니다. 이 연구를 위해 풍납토성 토기 시료의 제공 및 고고학적 조언을 해주신 국립문화재연구소 고고연구실 이성준 학예사님을 비롯한 관계자 분들께 감사드립니다. 또한 토기 시료의 전처리를 도와준 ㈜네오시스코리아 방사선응용연구센터의 박미선 선생님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 박순발, 제2회 서울경기고고학회 학술대회, 한양대학교 박물관, 서울, 7-38 (2003).
2. 신희권, 한국상고사학보, **37**, 29-51 (2002).
3. M. J. Aitken, 'An introduction to optical dating', Oxford University Press, London, 1998.
4. 김명진, 윤민영, 홍덕균, 한국문화재보존과학회지, **23**, 73-80 (2008).
5. M. J. Kim, J. H. Choi and D. G. Hong, *Geoscience*, **15**, 65-70 (2011).
6. 김명진, 양혜진, 홍덕균, 방사선방어학회지, **36**, 52-58 (2011).
7. 국립문화재연구소, '風納土城, 2011년 동성벽 발굴조사 현장설명회자료집', 2011.
8. S. J. Fleming, *Archaeometry*, **12**, 133-147 (1970).
9. N. A. Spooner, M. A. Aitken, B. W. Smith, M. Franks and C. McElroy, *Radiat. Prot. Dosim.*, **34**, 83-86 (1990).
10. L. Botter-Jenson, E. Bulur, G. A. T. Duller and A. S. Murray, *Radiat. Meas.,* **37**, 535-541 (2003).
11. R. M. Bailey, B. W. Smith and E. J. Rhodes, *Radiat. Meas.,* **27**, 123-135 (1997).
12. 국립문화재연구소, '한성지역 백제토기 분류표준화 방안연구', 서경출판사, 서울, 2011.
13. 식문화탐구회, '취사 실험의 고고학', 서경문화사, 서울, 2011.
14. A. S. Murray and A. G. Wintle, *Radiat. Meas.*, **32**, 57-73 (2000).
15. K. S. V. Nambi and M. J. Aitken, *Archaeometry*, **28**, 202-205 (1986).
16. J. M. Olley, A. S. Murray and R. G. Roberts, *Quat. Sci. Rev.*, **15**, 751-760 (1996).
17. J. R, Prescott and J. T. Hutton, *Radiat. Meas.,* **23**, 497-500 (1994).
18. J. Zimmerman, *J. Phys. C: Solid State Physics*, **4**, 3277-3291 (1971).