

## 감쇄기법(subtraction method)을 이용한 백제 무령왕릉 관련 전(塼)의 연대결정

김명진<sup>1</sup> · 송기웅<sup>1</sup> · 이찬희<sup>2</sup> · 장성윤<sup>3</sup> · Isao Takashima<sup>4</sup> · 홍덕균<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>(재)충청문화재연구원 부설 한국고환경연구소,

<sup>2</sup>공주대학교 문화재보존과학과, <sup>3</sup>국립문화재연구소 복원기술연구소

<sup>4</sup>Center for Geo-Environmental Science, Akita University, <sup>5</sup>강원대학교 물리학과

(2007. 9. 12. 접수. 2007. 10. 22. 승인)

## Age determination of bricks related to Muryong Royal Tomb of the Baekje Kingdom using subtraction method

Myung-Jin Kim<sup>1</sup>, Ki-Woung Song<sup>1</sup>, Chan-Hee Lee<sup>2</sup>, Sung-Yoon Jang<sup>3</sup>,  
Isao Takashima<sup>4</sup> and Duk-Geun Hong<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Chungcheong Cultural Properties Research Institute, Kongju 314-923, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

<sup>3</sup>Restoration Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 305-380, Korea

<sup>4</sup>Center for Geo-Environmental Science, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Japan

<sup>5</sup>Dept. of Physics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

(Received September 12, 2007; Accepted October 22, 2007)

**요 약:** 감쇄선량율에 대한 정보를 얻을 수 없는 백제 무령왕릉 출토 전(塼)과 송산리 고분 출토 전, 부여 정동리 가마유구 출토 전에 대한 절대연대를 산출하였다. 연대측정은 전 시료로부터 석영을 추출하여 열 냉광(thermoluminescence)을 미립자법(fine grain technique)에 적용하여 얻은 결과와 광 자극 냉광(optically stimulated luminescence)을 조립자법(quartz inclusion technique)에 적용하여 얻은 결과를 감쇄기법(subtraction method)에 대입하여 수행하였다. 연대측정 결과 각 시료의 연대 오차는 모두 6% 표준편차 이내로 매우 안정적이었으며, 산출된 연대측정치는 서로 오차범위 내에서 일치하였다. 최종적으로 이 연구를 통하여 결정된 백제 무령왕릉 관련 전의 연대는 AD 530±50 yrs (1σ SD)이었다.

**Abstract:** Age determination was carried out with the bricks relating to Muryong Royal Tomb of the Baekje Kingdom, for which there is no information on the external gamma dose rate, by using the subtraction method of luminescence dating. In the subtraction method, each paleodose for fine grain and for quartz inclusion is required for the sample to be dated. In this study, the paleodose for the fine grain was estimated by thermoluminescence measurement and the paleodose for the quartz inclusion was determined using optically stimulated luminescence. The resultant ages among the bricks showed good agreement with standard deviation of 6% error. Finally the bricks relating to Muryong Royal Tomb were evaluated as AD 530±50 yrs (1σ SD).

**Key words:** Muryong Royal Tomb, subtraction method, paleodose, fine grain technique, quartz inclusion technique

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)33-250-8473 Fax : +82-(0)33-250-9689

E-mail : dghong@kangwon.ac.kr

## 1. 서 론

냉광(luminescence) 연대측정법은 자연계에 일반적으로 존재하는 무기결정인 석영과 장석 등의 덫(trap)에 축적된 전자들로부터 기인되는 냉광이 주위 환경 방사선과 상관관계를 이루어 이들 냉광을 자연 선량계로 이용할 수 있음을 전제로 하며, 연대 결정은 다음 식에 의해 이루어진다.<sup>1</sup>

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

이중 고고선량(paleodose)은 매장기간 동안 대상 시료 내 석영과 장석 등의 무기결정이 자기 자신 뿐만 아니라 주변 토양 내에 존재하는 방사성 핵종 <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>87</sup>Rb 등의 붕괴에너지에 대한 등가선량(equivalent dose)을 의미하며 시료에서 화학적으로 추출한 석영 및 장석 등으로부터 냉광을 측정하여 산출된다. 고고선량과 달리 연간선량율(annual dose rate)은 대상 시료의 각 방사성 핵종으로부터 환산된 알파선량율과 베타선량율, 주변토양 내 각 방사성 핵종으로부터 무한대질(infinite matrix) 가정을 기초로 하여 환산된 감마선량율, 그리고 우주 방사선에서 기인한 우주선량율의 합으로 이루어지며 시료의 고고선량 증가에 원인이 된다.

냉광 연대측정 결과의 정확도는 일반적으로 절대연대측정법 중 고고학 분야에서 가장 광범위하게 사용되며 정확도 및 정밀도가 인정된 방사성탄소 연대측정기와 비교하여 검토되어진다. 현재 동일한 연대를 갖는 고고학 시료에 대하여 냉광 연대측정과 방사성탄소 연대측정을 각각 수행하여 비교한 결과, 1σ 표준편차 범위 내에서 서로 일치됨이 보고되고 있다.<sup>2,4</sup>

냉광 연대측정법은 측정될 석영이나 장석 등의 입자 크기에 따라 미립자법(fine grain technique)과 조립자법(quartz inclusion technique)으로 구분된다. 감쇄기법(subtraction method)은 자연방사선원의 비정거리 차이에 기초하여 미립자법과 조립자법을 결합한 연대결정법이다. 특히 감쇄기법의 경우 감마선량율에 대한 고려를 할 필요가 없기 때문에 주변 토양에 대한 정보가 없는 특정한 고고학 시료의 연대산출에 매우 유용하다.<sup>5,6</sup>

이 연구에서는 감마선량율에 대한 정보를 얻을 수 없는 백제 무령왕릉 출토 전(搏)<sup>1</sup>과 송산리 고분 출토

전, 부여 정동리 가마유구 출토 전 시료에서 석영을 추출하여 열 냉광(thermoluminescence: 이후 TL로 표기) 측정 결과를 미립자법에 적용하여 얻어진 고고선량과 광 자극 냉광(optically stimulated luminescence: 이후 OSL로 표기) 측정 결과를 조립자법에 적용하여 얻어진 고고선량을 감쇄기법에 대입하여 절대연대를 산출하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 감쇄기법 측정원리

감쇄기법은 자연방사선원의 비정거리 차이에 기초하여 미립자법과 조립자법을 결합한 연대결정법이다. 일반적으로 실트 크기의 퇴적층 내에서 매장기간 동안 알파입자가 시료에 영향을 미칠 수 있는 비정 거리는 약 30 μm 정도이고, 베타입자는 약 3 mm, 감마선은 약 30 cm 정도이다.<sup>7</sup>

미립자법의 경우 시료에서 2~10 μm의 입자만을 선별하여 연대측정에 사용하기 때문에 고고선량( $P_{FG}$ )은 식 (2)와 같이 시료로부터의 알파선량율( $D_\alpha$ )과 베타선량율( $D_\beta$ ), 주변토양으로부터의 감마선량율( $D_{\gamma, soil}$ ), 우주선량율( $D_C$ )의 영향을 받는다.<sup>8</sup> 또한 시료 자체의 두께가 충분히 큰 기와 및 전돌, 벽돌 등의 경우는 시료 자체의 감마선량율( $D_{\gamma, sample}$ )도 고려해 주어야 한다.

$$P_{FG}(\text{Gy}) = \text{Age} \times (kD_\alpha + D_\beta + D_{\gamma, sample} + D_{\gamma, soil} + D_C) \quad (2)$$

반면에 조립자법에서는 90~250 μm의 석영만을 추출한 후 불산(~48%)으로 한 시간 정도 부식시켜 석영의 표면을 식각하므로 고고선량( $P_{QI}$ )은 식 (3)과 같이 알파입자에 의한 영향과 식각된 표면에 존재하는 약 10%의 베타선량율의 영향은 고려하지 않는다.<sup>9</sup>

$$P_{QI}(\text{Gy}) = \text{Age} \times (0.9D_\beta + D_{\gamma, sample} + D_{\gamma, soil} + D_C) \quad (3)$$

따라서 미립자법에서 얻어진 고고선량은 조립자법에서 얻어진 고고선량보다 큰 값을 가지며 이 차이는 시료의 알파선량율과 부식으로 식각된 표면에 존재하는 약 10%의 베타선량율로부터 기인된다.

감쇄기법에서의 연대는 미립자법에서 산출된 고고선량과 조립자법에서 산출된 고고선량의 차로부터 구할 수 있으며 식 (4)와 같이 표현된다.

<sup>1</sup> 흙을 구워 정사각형 또는 직사각형의 납작한 벽돌 모양으로 만든, 동양의 전통적 건축 재료. 여러 가지 모양과 무늬가 있으며 주로 바닥과 벽의 재료로 쓴다.

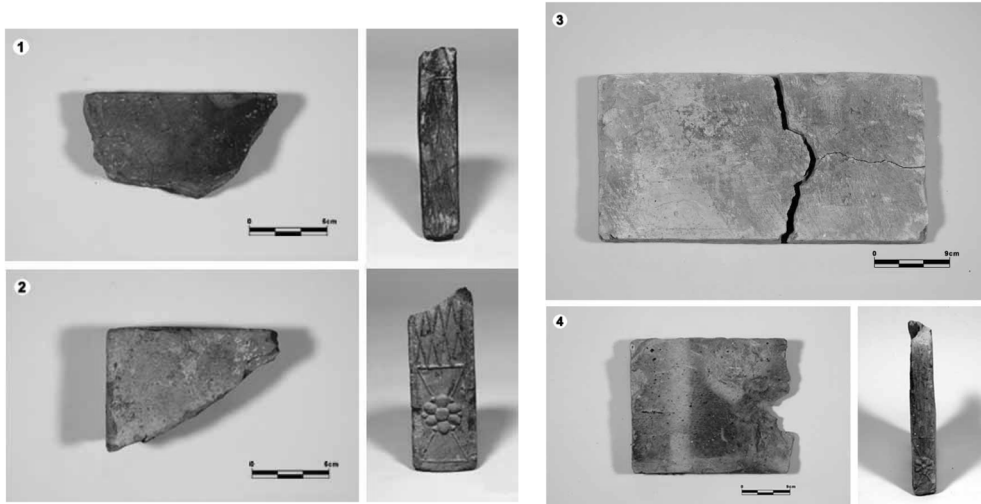


Fig. 1. Samples used for age determination (1: 726-7, 2: 726-8, 3: 510-31, 4: JDB-1).

$$\text{Age}(\text{yr}) = \frac{P_{\text{FG}} - P_{\text{OI}}}{kD_{\alpha} + 0.1D_{\beta}} \quad (4)$$

위 식에서  $k$  값은 비정거리와 이온화도에 관계된 베타선원에 대한 알파선원의 냉광 유발효과를 나타내는 값이며 각 시료에 대하여 실험적으로 결정된다.

감쇄기법을 이용한 절대연대측정은 감마선량율에 대한 고려없이 연대 산출이 가능하므로 주변토양이 균질하지 않거나 출토지가 불분명하여 유물의 매장 환경에 대한 정보가 없는 시료, 박물관 등에서 오랫동안 보관된 시료, 시료 자체가 두꺼워 내부 감마선량율도 고려해야만 하는 시료의 연대측정에 특히 유용하다.

## 2.2. 시료 및 전처리

이 연구에 사용된 시료들은 Fig. 1과 같으며, 고고선량 측정을 위하여 이 중 일부분만을 절단하여 연대측정에 사용하였다. 시료의 이름은 무령왕릉 시료의 경우 726-7과 726-8로, 송산리 고분에서 출토된 시료는 510-31으로, 정동리 가마유구 출토 전은 JDB-1로 각각 명명하였다.

시료로부터 연대측정에 이용될 석영을 추출할 때 가장 주의해야 할 사항은 시료가 빛에 노출되지 않도록 하는 것이다. 이를 위해 암실에서 다이아몬드 휠을 이용하여 빛에 노출된 시료의 바깥부분을 2 mm 이상 제거한 후 빛에 노출되지 않은 부분을 준비하였다. 이후 마노 유발을 이용하여 시료를 적당히 분쇄한 후 표준망체를 이용하여 90  $\mu\text{m}$  보다 큰 크기의 입자와 90  $\mu\text{m}$  보다 작은 크기의 입자로 분리하였다. 시료로

부터 미립자 추출은 90  $\mu\text{m}$  보다 작은 크기의 입자만을 이용하여 Zimmerman에 의해 제안된 방법<sup>8</sup>으로 수행되었으며, 석영 조립자의 추출은 90  $\mu\text{m}$  보다 큰 크기의 입자만을 이용하여 Fleming에 의해 제안된 방법<sup>9</sup>으로 수행하였다. 석영 조립자 내의 장석 오염도를 평가하기 위하여 약간의 석영을 임의로 채취하여 적외선을 조사한 후 냉광이 검출되지 않음을 통하여 장석의 오염이 없음을 확인하였다.<sup>10</sup> 이와는 별도로 시료로부터 제거된 바깥부분은 연간선량을 산출을 위한 자연 방사성원소의 농도 측정에 사용되었다.

## 2.3. 실험기기

모든 냉광 측정은 (재)충청문화재연구원 부설 한국 고환경연구소와 강원대학교 공동실험실습관에 설치되어 운영 중인 자동화된 Riso TL/OSL 시스템(Riso TL/OSL-DA-20)에 의해 이루어졌다.<sup>11</sup> TL 측정은 5°C/s의 가열속도로 450°C까지 시료를 가열하여 이루어졌다. 미립자 시료에 대한 TL 측정에 앞서 공기 중에 존재하는 불순물 및 시료 표면에서 기인하는 유사 TL(spurious TL) 신호의 방지를 위하여 0.01 Torr 이하의 진공상태에서 고순도 질소가스(99.999%)를  $2 \times 10^3 \text{ Pa}$ 의 압력과 1.5 l/min의 유량으로 주입한 후 TL을 측정하였다.<sup>1</sup> OSL 측정에서는 470  $\pm$  30 nm의 파장을 가진 청색 발광 다이오드(Nichia type NSPB-500S)가 여기광원으로 사용되었으며 광원의 최대 세기는 50 mW/cm<sup>2</sup> 정도이다. 여기광원과 OSL의 분광을 위하여 GG420 필터가 여기광원 앞에 부착되었다. 냉광의 분

광을 위하여 TL 측정의 경우 BG39와 7-59 필터를 조합하여 사용하였으며 OSL 측정의 경우 Hoya U-340 필터를 이용하였다. 최종적으로 냉광의 세기는 광전자 증배관(EMI 9635QA photomultiplier)으로 검출되었으며 검출기의 전기적 잡음(electric noise) 및 배경 신호(background signal)는 50 counts/s 이하였다.

실험실 방사선 조사를 위하여  $^{241}\text{Am}$  알파 표준선원(10.3 MBq)과  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  베타 표준선원(1.48 GBq)을 사용하였다. 상온에서 미립자 시료에 조사되는 알파입자의 전리성 에너지는  $^{241}\text{Am}$  표준선원으로부터 제공되며 실험실 조사 시 공기 중에서 알파입자의 에너지 손실(energy loss)을 방지하기 위하여 0.01 Torr 이하로 진공을 유지하였다. 사용된 방사선원의 에너지 보정 결과  $^{241}\text{Am}$  표준선원으로부터 미립자 시료가 받는 흡수선량은 0.42 Gy/s이었으며,  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  표준선원으로부터 조립자 시료가 받는 흡수선량은 0.098 Gy/s이었다.

연간선량률 산출을 위한 시료의 방사성동위원소  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ 의 농도(mg/kg)는 한국기초과학지원연구원에 설치된 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP/MS: PQ3 model, Thermo Elemental Ltd.)와 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP/AES: SHIMADZU ICPS-1000III)에 의한 원소분석을 통하여 산출되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 열 전처리

미립자 시료의 고고선량 결정에 필요한 TL 측정에서 플래토우 구간(자연 방사선 TL 신호와 시료에 실험실 방사선 조사 후 측정되는 TL 신호의 비가 안

정적인 구간)을 찾기 위하여 열 전처리 실험을 수행하였다. 각 시료에 대한 열 전처리 실험 결과 실험실 조사 방사선원의 크기와 무관하게 220°C의 온도에서 자연 방사선 TL 신호와 실험실 조사 방사선 TL 신호가 유사함을 보였다. Fig. 2는 726-8 시료에 대한 열 전처리 실험 결과의 한 예이며 TL 신호 중 약 200°C 부근에 존재하는 불안정한 띠에서 기인되는 TL 성분이 열 전처리 온도가 증가함에 따라 점차로 사라지며 220°C에 이르면 자연 방사선 TL 신호와 실험실 방사선 조사 후 측정되는 TL 신호가 서로 유사해짐을 알 수 있다.

조립자 시료에 대한 OSL 측정에서는 시료에 실험실 방사선 조사시 빛에 민감한 불안정한 띠(110°C TL 피크)에 전자가 포획되는 현상을 방지하고, 매장기간 동안 자연 시료에서 발생할 수 있는 열적전환(thermal transfer)을 고려하여 260°C에서 10초 동안 열 전처리를 수행하였다.

#### 3.2. 미립자법 고고선량 산출

미립자 시료에 대한 고고선량 산출은 여러 개의 시료 디스크에서 얻은 TL 신호를 부가선량법(multiple aliquot additive dose method: MAAD)에 적용하여 수행하였다.<sup>8</sup> 고고선량 결정을 위하여 총 15개의 시료 디스크를 사용하였다. 우선 6개의 시료 디스크를 220°C에서 10초 간 열 전처리 한 후 450°C까지 가열하여 자연 방사선 TL을 측정하였다. 이후 각 3개씩의 시료 디스크에 실험실 베타선원  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 을 이용하여 부가선량을 5Gy, 10Gy, 15Gy 조사하고, 220°C에서 10초 간 열 전처리 한 후 450°C까지 가열하여 실험실 조사

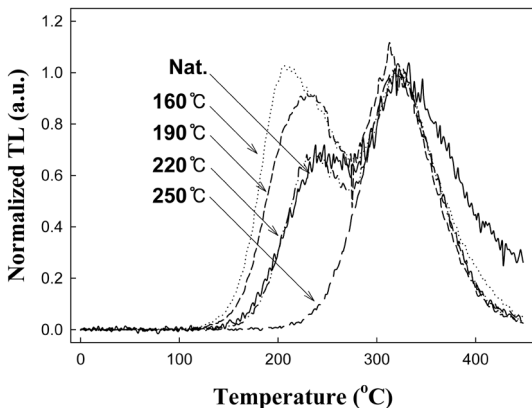


Fig. 2. TL signals for different preheating temperatures of the sample 726-8.

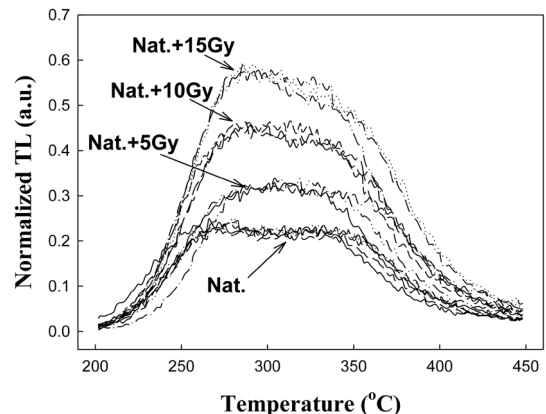


Fig. 3. TL signals measured for natural dose and additional beta doses for the sample 726-8.

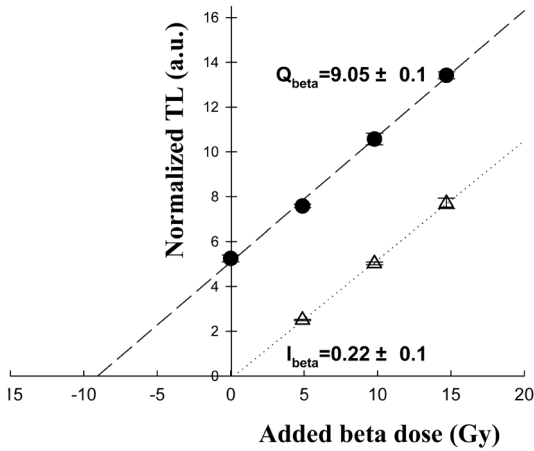


Fig. 4. An example of paleodose determination by using multiple aliquot additive dose method for the sample 726-8.

TL을 측정하였다. 각 디스크 간의 시료 양 차이에 의한 TL 신호의 규격화(normalization)는 각 시료 디스크에 동일한 방사선량을 조사한 후 측정된 TL 신호를 이용하여 보정하였다. Fig. 3은 부가선량법으로 측정 후 규격화된 각 시료 디스크의 TL 신호 예이며, 플래토우가 형성된 280°C~320°C 사이의 TL 신호가 고고선량 결정에 이용되었다.

고고선량 산출을 위하여 방사선 조사량과 TL 신호로 만들어진 성장곡선은  $y=ax+b$ 의 형태인 선형방정식에 의해 외삽 되었으며 직선의 x 절편 값이 고고선량에 해당된다(Fig. 4). 각 시료의 고고선량을 Table 1에 Q 값으로 정리하였다. 저준위 방사선량 영역에서의 초선형성(supralinearity) 현상<sup>1</sup>을 조사하기 위하여 자연 방사선 TL 신호가 측정된 6개의 시료 디스크를 각각 3개의 그룹으로 다시 구분한 후 실험실 베타선원 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y을 이용하여 각각 5Gy, 10Gy, 15Gy 실험실 방사선을 조사하고 2차 TL 신호를 측정하였다. 1차 TL 신호와 동일한 플래토우 구간에서 합산한 TL 신호를 이용하여 성장곡선을 만들었다. Fig. 4에서 보듯이 2차 TL 신호도 1차 TL 신호와 같은 선형의 형태를 보였으며

두 직선이 서로 근사적으로 평행함을 알 수 있었다. 2차 TL 신호를 이용한 초선형성의 보정값을 Table 1에 I 값으로 정리하였다. 최종적으로 미립자 시료에 대한 고고선량은 1차 TL 측정에서 산출된 Q 값과 2차 TL 측정에서 산출된 I 값의 합으로 결정하였다.

### 3.3. k 값

미립자 시료에 측정된 고고선량은 연간선량을 중 베타선량을 및 감마선량을, 우주선량을 뿐만 아니라 알파선량에 의한 영향도 포함되어져 있다. 일반적으로 TL 연대측정에서의 고고선량은 베타선원(또는 감마선원)의 선량을 기준으로 나타내며, 이로부터 알파선원의 상대적인 TL 유발효과를 보정할 수 있다. k 값은 비정거리와 이온화도에 관계된 베타선원에 대한 알파선원의 냉광 유발효과를 나타내는 값으로 각 시료에 대하여 식 (5)로부터 실험적으로 결정된다.

$$k = \frac{Q_{\beta}}{Q_{\alpha}} \tag{5}$$

이 연구에서는 미립자 시료에 실험실 알파선원

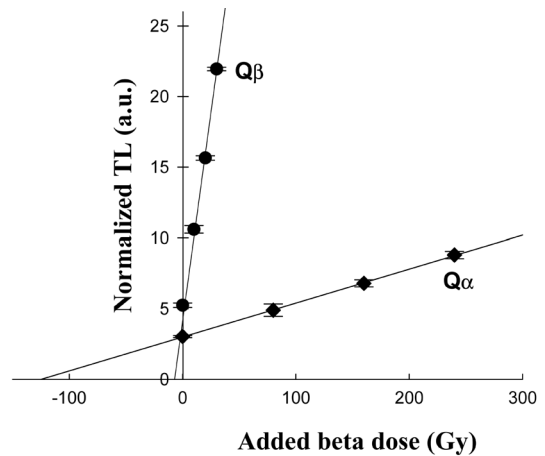


Fig. 5. An example of  $Q_{\alpha}$  and  $Q_{\beta}$  measurement for k value calculation of the sample 726-8.

Table 1. Paleodose of fine grain for each sample obtained by using the multiple aliquot additive dose method

Sample	Preheat (°C/s)		k-value	Ave. paleodose (Gy)			
	alpha	beta		$Q_{\alpha}$	$Q_{\beta}$	$I_{\beta}$	$P_{FG}$
726-7	220/10	220/10	0.087	115.12	10.07	0.20	10.27
726-8	220/10	220/10	0.072	125.44	9.05	0.22	9.27
510-31	200/10	200/10	0.074	100.77	7.48	0.40	7.88
JDB-1	220/10	200/10	0.066	129.02	8.55	0.43	8.98

$^{241}\text{Am}$ 을 조사하여 고고선량  $Q_\alpha$ 를 산출하였다. 이를 위하여 자연 방사선 TL 신호와 실험실에서 약 80Gy, 160Gy, 240Gy로 주어진 부가선량에 대한 TL 신호를 측정하였다. 열 전처리와 TL 측정, 플래토우 테스트는 선행된 미립자법의 고고선량 산출방식과 동일하게 수행하였다. 신호의 합산 후 직선을 이용한 외삽을 통해 최종적으로 고고선량  $Q_\alpha$ 를 얻었으며 각 시료에 대한 고고선량 값을 Table 1에 정리하였다. Fig. 5는  $Q_\alpha$ 와  $Q_\beta$ 와의 비교를 통해 k 값을 산출한 예이다.

3.4. 조립자법 고고선량 산출

석영 조립자 시료의 고고선량은 OSL 신호를 단일 시료 재현법(single aliquot regenerative-dose method)<sup>12</sup>에 적용하여 산출하였으며, Fig. 6에 실험과정을 도식하였다.

먼저 자연 방사선 OSL 신호를 측정하기 위하여 260°C에서 10초 간 열 전처리 후, 125°C에서 40초 동안 여기하면서 OSL 신호를 측정하였다( $L_N$ ). 냉광의 민감도 변화(sensitivity change)를 보정하기 위하여 같은 시료에 시험 방사선을 주고 시간적으로 불안정한 빛에 포획된 전자의 제거를 위해 220°C까지 가열한 후, 시험 방사선의 조사로 인한 OSL 신호를 측정하였다( $T_N$ ). 이후 실험실 방사선 조사, 열 전처리 및 OSL 신호 측정을 여러 번 반복하여 성장곡선을 만들고, 시험 방사선 조사로부터 얻어진 보정 인자로 성장곡선을 보정하였다( $Lx/Tx$ ). 빛과 열에 민감한 빛에서만 방출되는 냉광만을 고려하기 위하여 최초 약 0.5초 동안 방출된 OSL 신호만을 각각 합산하고 이를 성장곡선

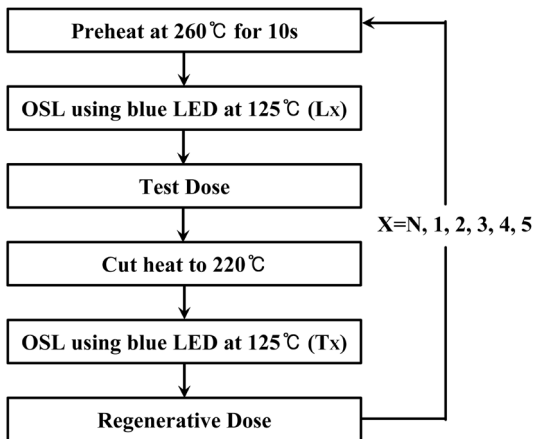


Fig. 6. Procedure of the single aliquot regenerative dose method used for paleodose determination of quartz inclusion.

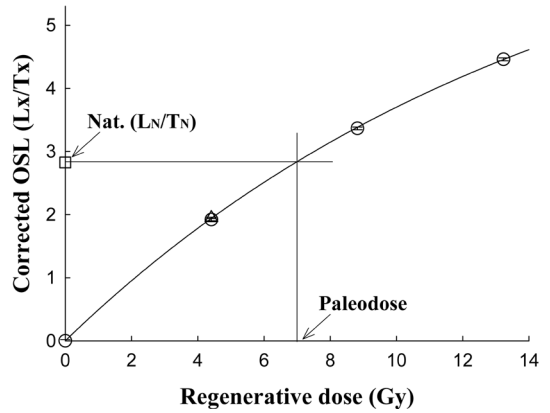


Fig. 7. An example of paleodose determination by using the single aliquot regenerative dose method for the sample 726-8.

Table 2. Paleodose of quartz inclusion for each sample obtained by using the single aliquot regenerative-dose method

Sample	Preheat (°C/s)	Number of aliquot used	Recycle ratio	Ave. $P_{Q1}$ (Gy)
726-7	260/10	10	1.03 ± 0.01	7.46
726-8	260/10	10	1.02 ± 0.02	7.11
510-31	260/10	3	1.07 ± 0.11	5.76
JDB-1	260/10	7	1.06 ± 0.13	6.32

과 보정에 이용하였다.

단일시료 재현법을 이용하여 얻어진 성장곡선으로부터 고고선량을 구한 예를 Fig. 7에 나타내었다. 냉광의 민감도 변화에 대한 보정의 성공 여부는 성장곡선을 만든 후, 성장곡선을 만들기 위하여 시료에 조사한 첫 실험실 방사선 양을 시료에 다시 조사하여(Fig. 7에서 Δ) 처음의 측정값과 같은지를 비교하여 판단하였다. 이를 Table 2에 “Recycle ratio”로 표현하였으며, 이 값이 1에 가깝다는 것은 냉광의 민감도 변화에 대한 보정이 성공적으로 이루어졌음을 의미한다. 각각의 시료에 대하여 10개의 시료 디스크가 고고선량 산출에 사용되었다. 각 시료에 대하여 적용된 단일시료 재현법의 조건 및 산출된 고고선량의 평균값을 Table 2에 정리하였다.

3.5. 연간선량율

연간선량율은 일반적으로 시료의 방사성 핵종  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  등의 농도(mg/kg)를 측정하고 변환인자를 사용하여 계산된 알파선량율과 베타선량율, 감마선량율을 우주선량율과 합산하여 산출된다.<sup>13,14</sup> 이

Table 3. Radionuclide concentration and annual dose rate for each sample

Sample	K (%)	Th (mg/kg)	U (mg/kg)	D <sub>r</sub> (Gy/ka)	D <sub>c</sub> (Gy/ka)
726-7	1.74 ± 0.09	17.81 ± 0.89	3.38 ± 0.17	22.56 ± 0.81	2.42 ± 0.08
726-8	1.58 ± 0.08	16.70 ± 0.84	2.99 ± 0.15	20.66 ± 0.74	2.20 ± 0.07
510-31	1.63 ± 0.08	16.62 ± 0.83	3.07 ± 0.15	20.82 ± 0.75	2.25 ± 0.07
JDB-1	1.89 ± 0.09	22.60 ± 1.13	3.87 ± 0.19	27.46 ± 0.99	2.75 ± 0.09

Table 4. Result of age determination for the bricks relating to Muryong Royal Tomb of the Baekje Kingdom

Sample	ΔP (Gy)	Corrected annual dose rate (Gy/ka)	Age (yrs, BP)	Calendar age (yrs, AD)
726-7	2.80 ± 0.14	1.88 ± 0.06	1490 ± 90	520 ± 90
726-8	2.17 ± 0.11	1.45 ± 0.05	1490 ± 90	520 ± 90
510-31	2.11 ± 0.11	1.51 ± 0.05	1410 ± 80	600 ± 80
JDB-1	2.66 ± 0.13	1.78 ± 0.06	1500 ± 90	510 ± 90

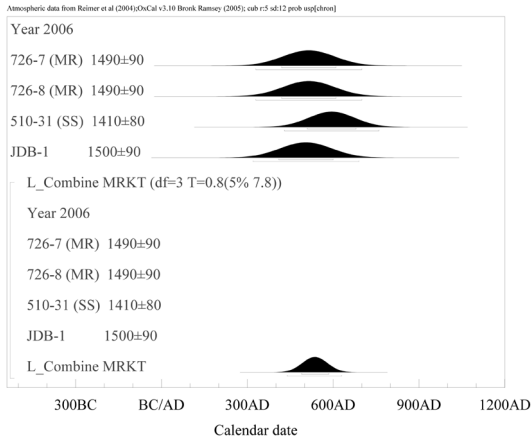


Fig. 8. Combined result of the luminescence dates of the bricks relating to Muryong Royal Tomb of the Baekje Kingdom by using the Oxcal program.

는 연간선량율에 영향을 주는 방사선의 최대 비정 영역에서 매질이 균질한 경우 에너지 보존법칙에 의해 단위 질량당 에너지 흡수비는 에너지 방출비와 같다는 무한매질 가정을 기초로 한다.

원소분석을 통해서 산출된 백제 무령왕릉 관련 전 시료의 방사성 핵종 농도와 환산된 연간선량율을 Table 3에 정리하였다. 시료의 연대결정을 위하여 감쇄기법을 적용하였으므로 식 (4)에 나타난 것과 같이 방사성 핵종 농도로부터 알파선량율과 베타선량율만을 환산하였다. 최종적인 연간선량율은 수분 함량에 대한 보정을 통하여 결정되었다.<sup>8</sup>

### 3.6. 연대산출

시료의 연대는 식 (4)를 이용하여 결정되었으며, 연

대결정에 이용된 고고선량(ΔP) 및 보정된 연간선량율과 함께 Table 4에 정리하였다. 고고선량의 오차는 일반적으로 냉광 연대측정법에서 열에 의해 절대연년이 이루어진 토기 및 기와, 화덕자리 등의 시료에 대하여 보고되고 있는 5%의 표준편차를 사용하였다.<sup>3,15</sup> 감쇄기법으로부터 얻어진 각 시료의 연대는 모두 6% 표준편차 이내의 오차를 가졌으며, 이로부터 결정된 연대가 매우 안정적임을 알 수 있다.

이 연구에 이용된 시료는 모두 무령왕릉 관련 시료이고 연대 또한 서로 오차범위 내에서 일치하므로 각 연대를 결합하면 정확하고 정밀한 연대 산출이 가능하다. 이를 위하여 Oxcal 프로그램을 이용하여 각 연대를 결합하였다.<sup>16,17</sup> Fig. 8은 Oxcal 프로그램을 이용하여 각 연대측정치를 결합한 결과이다. 최종적으로 백제 무령왕릉 관련 전 시료의 연대는 AD 530±50 yrs (1σ SD)으로 산출되었다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 발굴조사 완료 후 박물관에 소장되어 주변 환경방사선에 대한 정보를 얻을 수 없는 백제 무령왕릉 출토 전(搏)과 송산리 고분 출토 전, 부여 정동리 가마유구 출토 전에 대하여 감쇄기법을 적용하여 절대연대를 산출하였다. 연대측정 결과 각 시료의 연대 오차는 모두 6% 표준편차 이내로 매우 안정적임을 알 수 있었다. 또한 각 연대측정치가 서로 오차범위 내에서 일치하므로 이를 결합하여 정확하고 정밀한 연대 산출을 시도하였다. 최종적으로 이 연구에서 분석한 백제 무령왕릉 관련 전의 연대는 AD 530±50 yrs(1σ SD)으로 산출되었다.

이 연구에서와 같이 감쇄기법을 이용한 절대연대측정은 앞으로 고고학 시료 중 주변토양이 균질하지 않거나 출토지가 불분명하여 유물의 매장 환경에 대한 정보가 없는 시료, 박물관 등에서 오랫동안 보관된 시료 등의 연대측정 뿐만 아니라 시료 자체가 두꺼워 내부 감마선량을 고려해야만 하는 시료의 연대측정 등에 매우 폭넓게 적용되어지리라 사료된다.

### 감사의 글

이 연구를 위하여 무령왕릉 관련 전 시료의 제공 및 고고학적 조언을 해주신 국립공주박물관 신창수 관장님을 비롯한 관계자 분들께 감사드립니다. 이 연구는 강원대학교 기초과학지원연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. M. J. Aitken, "Thermoluminescence dating", Academic Press, London, 1985.
2. D. G. Hong, R. B. Galloway, M. J. Kim and S. B. Park, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **256**(2), 365-368 (2003).
3. 김명진, 홍덕균, *Anal. Sci. & Tech.*, **18**, 329-337 (2005).
4. 김명진, *鎭江考古*, **2**, 153-170 (2005).
5. S. J. Fleming and D. Stoneham, *Archaeometry*, **15**, 229-238 (1973).
6. 신현상, 이창우, 남영미, 지광용, 박병빈, *Anal. Sci. & Tech.*, **13**, 403-411 (2000).
7. M. J. Aitken, "An introduction to optical dating", Oxford University Press, London, 1998.
8. J. Zimmerman, *Archaeometry*, **13**, 29-52 (1971).
9. S. J. Fleming, *Archaeometry*, **12**, 133-147 (1970).
10. N. A. Spooner, M. A. Aitken, B. W. Smith, M. Franks and C. McElroy, *Radiat. Prot. Dosim.*, **34**, 83-86 (1990).
11. L. Botter-Jenson, E. Bulur, G. A. T. Duller and A. S. Murray, *Radiat. Meas.*, **37**, 535-541 (2003).
12. A. S. Murray and A. G. Wintle, *Radiat. Meas.*, **32**, 57-73 (2000).
13. K. S. V. Nambi and M. J. Aitken, *Archaeometry*, **28**, 202-205 (1986).
14. J. R. Prescott and L. G. Stephan, *PACT*, **8**, 205-213 (1982).
15. 김명진, 홍덕균, *J. Conserv. Sci.*, **16**, 5-14 (2004).
16. C. Bronk Ramsey, *Radiocarbon*, **37**(2), 425-430 (1995).
17. C. Bronk Ramsey, "OxCal Program v3.8 manual", University of Oxford Radiocarbon Accelerator Unit, 2002.