위글 매치를 이용한 서천 봉선리 유적 출토 목곽고의 방사성탄소연대 측정

이광희 | 김수철¹

한국전통문화대학교 문화재보존과학과

Wiggle Matched Radiocarbon Dates of Wooden Warehouses Excavated at the Bongseon-ri Site in Seochon, Korea

Kwang-Hee Lee | Su-Chul Kim¹

Department of Conservation Science, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 33115, Korea

¹Corresponding Author: kim6768@hanmail.net, +82-41-830-7366

초록 서천 봉선리 유적에서 출토된 목곽고의 제작 연대는 출토된 토층 및 토축부의 축조방법으로 5세기 전후로 추정되었다. 정확한 연대를 확인하고자 목곽부재 3점에 대해 위글매치를 이용한 방사성탄소연대분석을 실시하였다. 목곽부재 1(BSMG 01)의 최외각 연륜은 95.4% 신뢰구간에서 AD 431~551년, 목곽부재 2(BSMG 06)는 AD 460~570년으로 확인되었고 목곽부재 3(BSMG 12)은 AD 240~430년 또는 AD 490~510년으로 산출되었다. 목부재 3점의 공통 연대는 AD 490~510년으로 고고학적으로 추정된 연대와 일치하였으며, 위글매치를 이용한 방사성탄소연대측정의 정확성을 입증할 수 있었다.

중심어: 목곽고, 방사성탄소연대, 위글매치, 봉선리 유적

ABSTRACT It was estimated that wooden warehouses excavated from Bongseon-ri site in Seochon were built around the 5th century according to the soil layers and construction methods of earthen structures. In order to identify the exact date, three wooden materials (BSMG 01, 06, and 12) from wooden warehouses were analyzed through radiocarbon dating using wiggle match. The outermost ring of BSMG 01 produced a radiocarbon date (95.4% confidence interval) of AD 431~551, BSMG 06 produced a date of AD 460~570, and BSMG 12 produced dates of either AD 240~430 or AD 490~510. The common age of the three wooden materials was identified as AD 490~510 and coincided with the original estimated archaeological age. Therefore, this study proved the accuracy of radiocarbon dating using wiggle match.

Key Words: Wooden warehouses, Radiocarbon dating, Wiggle-match, Bongseon-ri site

1. 서론

목재에 대한 과학적인 연대측정법으로는 연륜연대측정법과 방사성탄소연대측정법이 있다. 연륜연대측정법은 나무의 연륜 패턴을 관찰하여 연륜 하나하나에 절대연대를

부여하는 방법으로(Schweingruber, 1983), 1910년대 천문학자인 미국 애리조나 대학의 Andrew E. Douglass 교수에 의해 밝혀졌다. 유럽은 1960년대에 연구가 시작되었으며, 우리나라에서는 1999년부터 시작되어 현재까지 건축물과 불상을 비롯한 관재, 목주 등 다양한 발굴목재에 대해 이용

되고 있다(Park *et al.*, 2001). 방사성탄소연대측정법은 시료 속에 함유된 방사성탄소의 농도를 측정하고 방사성탄소의 반감기를 이용하여 연대를 계산하는 것으로 1950년경 시카고대학의 Libby에 의해 알려진 후 세계적으로 널리 이용되고 있는 절대연대측정법이다.

본 연구에 적용된 위글 매치(wiggle-match)를 이용한

방사성탄소연대측정법은 일정 간격(5년~10년)의 나이테에 대해 연속적으로 탄소연대를 측정한 후, 방사성탄소 보정커브에 나타난 단기간 변동인 wiggle에 일치시켜 정확한 절대연대를 찾을 수 있는 방법이다(Ramsey *et al.*, 2001). Wiggle match를 이용한 방사성탄소연대측정으로 연대를 밝혀낸 대표적인 국내 연구는 승례문 현판이 AD 1469년

Figure 1. Bongseon-ri site(A) and excavation state of wooden warehouse(B).

Figure 2. The materials of wooden warehouse. (A) Wooden materials in the water tank, (B) Wooden material 1(BSMG 01), (C) Wooden material 2(BSMG 06), (D) Wooden material 3(BSMG 12).

Table 1. The list and information on ring number in each wooden material selected for radiocarbon dating

Sample	ID	No. of tree ring	Bark	Measured tree-ring No.	Institution of measurement
Wooden material 1	BSMG 01	41	-	25~30th 35~40th	Beta analytic
Wooden material 2	BSMG 06	61	-	2th 59~61th	Korea institute of geoscience and mineral resources
Wooden material 3	BSMG 12	8	Y	8th	

-1554년으로 확인된 것과(Park *et al.*, 2010) 백두산의 화산분출 연대에 대한 연구에서 목탄과 나무시료에 대해 위글 매치를 실시한 예가 있다(Jwa *et al.*, 2003). 또한 울산 반구동 목책시설의 목주에 대해 위글매치 분석을 실시하여 AD 829~929년에 별채된 것으로 밝혀졌고(Jeong, 2011), 인천 영흥도선 목부재가 가지고 있는 최외각연륜의 연대가 AD 710~730년 또는 AD 750~774년으로 확인되었다(Nam *et al.*, 2015).

서천 봉선리 유적은 사적 제473호로 2014년 시굴조사에서 3단 방형형태의 제단으로 보이는 제사유적이 발견되었다. 이러한 규모와 형태의 예는 극히 드물고 백제시대의 상장의례를 추정할 수 있기 때문에 2016년 발굴조사가 진행되었고 그 과정에서 형태가 완전한 목곽고 1기가 추가로 발굴되었다. 목곽고는 가로 4.8 m, 세로 4.7 m, 깊이 3.5 m로 현재까지 발견된 백제 목곽고 가운데 최대크기이며(Figure 1), 내부에서는 토기류, 동·식물 유존체, 목기류 등 다양한 유물이 출토되었으나 정확한 연대를 추정할 수 있는 유물과 자료는 매우 적었다(Chungnam Institute of History and Culture, 2016). 따라서 본 연구에서는 서천 봉선리 유적에서 출토된 목곽고 부재에 대해 위글매치를 이용한 방사성탄소연대측정을 통해 목곽고가 제작된 정확한 연대를 확인하고자 하였다.

2. 분석대상 및 방법

2.1. 분석대상

서천 목곽고는 3 m 이상의 대형부재 56점을 포함한 약 340개의 목부재들로 이루어져 있었다(Figure 2A). 이 중 가공된 표면을 관찰하여 나이테가 노출되어 있는 단면을 포함하고 있으며, 수피부에 매우 근접할 것으로 추정되는

2점의 부재를 선별하여 위글매치를 이용한 방사성탄소연대분석을 실시하였다(Figure 2B, 2C). 또한 완전한 수피를 가지고 있는 부재 1점이 확인되어 방사성탄소연대측정을 단독으로 실시하였다(Figure 2D). 연대측정에 앞서 수종 분석을 실시하여 3점의 부재들은 모두 참나무과 참나무속 상수리나무아속 중 상수리나무류로 식별되었다.

2.2. 분석방법

위글매치를 이용한 방사성탄소연대측정을 위해서는 정확한 연륜수와 연륜경계를 확인하는 것이 매우 중요하다. 선별된 3점을 관찰하여 확인되는 연륜은 LINTAB 측정기를 이용하여 연륜폭을 0.01 mm단위까지 측정하였다.

방사성탄소연대측정은 신뢰성과 교차검증을 위해 미국 BETA연구소(BSMG 01)와 한국지질자원연구원(BSMG 06, BSMG 12)에 의뢰하였으며 시료의 전처리 는 산-알칼리-산(AAA)법으로 진행되었다. Wiggle-matching 분석에 사용된 미지의 나이테 시료들은 실제 연대가 가장 오래된 것부터 최근 것 순서로 정렬한 후, 각 시료들의 방사성탄소연대 Gaussian 확률분포를 보정 프로그램에서 Bayesian 통계 분석법으로 계산하면, 매우 정확한 보정연대 확률분포를 산출해 낼 수 있다(Ramsey *et al.*, 2001). 각 시료의 일치도(agreement)는 wiggle matching 분석을 수행한 보정연대 확률분포 분석을 수행하기 전 보정연대 확률분포의 일치 정도를 나타낸다. 유의성 검정은 확률분포에서 전체 일치도(A : overall agreement)와 수용한계(An : acceptability threshold)를 비교하는 χ^2 (카이제곱)검정으로 실시하였으며, 전체 일치도 A가 수용한계 An 보다 클 때 χ^2 검정을 만족하며 wiggle matching 분석 결과를 신뢰할 수 있다. 각 부재들에 대한 연륜정보 및 시료채취 위치는 Table 1과 Figure 3에 나타내었다.

Figure 3. Ring-width chronologies from wooden materials for BSMG 01, BSMG 06 and BSMG 12 (X-axis: tree-ring number, Y-axis: tree-ring width $\times$ 100 mm).

3. 결 과

3.1. 방사성탄소연대 측정 결과

서천 목곽고 부재 3점에서 채취한 시료 5점에 대한 개별 방사성탄소연대 측정결과, 미국 BETA 연구소에서 측정한

BSMG 01의 25~30번째 연륜은 95.4% 신뢰구간에서 ^{14}C 보정연대가 AD 420~610년, 35~40번째 연륜은 AD 410~550년으로 확인되었다(Table 2). 또한 한국지질자원연구소에서 측정한 BSMG 06의 2번째 연륜은 95.4% 신뢰구간에서 ^{14}C 보정연대가 AD 410~600년, 59~61번째 연륜은 AD 410~560년 사이로 확인되어 약 200년의 동일한 구간

Table 2. The results of radiocarbon dating

Sample	ID	Measured tree-ring No.	¹⁴ C dates (before calibration)		Calibrated dates (AD, 95.4% C.I.)
			BP	Standard deviation	
Wooden material 1	BSMG 01	25~30th	1540	40	420AD (95.4%) 610AD
		35~40th	1580	30	410AD (95.4%) 550AD
Wooden material 2	BSMG 06	2th	1550	40	410AD (95.4%) 600AD
		59~61th	1570	30	410AD (95.4%) 560AD
Wooden material 3	BSMG 12	8th	1680	40	240AD (94.7%) 430AD
					490AD (0.7%) 510AD

Figure 4. Probability profiles of radiocarbon date (Y-axis) and calibrated date (X-axis) for 8th tree-ring of BSMG 12.

에 포함되었다(Table 2). 특히 수피가 존재하는 BSMG 12의 수피부 연륜(8th)에 대한 방사성탄소연대측정 결과, 95.4% 신뢰구간에서 AD 240~430년(94.7%), AD 490~510년(0.7%)으로 계산되었다. 따라서 시료에 잔존하는 최외각 연륜은 AD 240~510년 사이에 형성된 것으로 95.4% 확신할 수 있으며, 이 연대 구간이 BSMG 12의 벌채된 연대가 된다(Figure 4).

3.2. 위글 매치 분석 결과

BSMG 01의 연륜시료 2개에 대하여 위글매치를 이용한 분석결과(n=2), 전체 일치도 A=104.1%이며, 수용한계(5% 유의수준) An은 50.0%이므로 χ^2 검정을 만족하였다(Figure 5). BSMG 01의 마지막 측정시료인 35-40번째 연륜에 대한 95.4% 신뢰구간이 AD 430~550년으로 계산되었다. 따라서 시료에 잔존하는 최외각 연륜은 1년을 더한 AD 431~551년 사이에 형성된 것으로 95.4% 확신할 수 있으며, 이 연대 구간이 BSMG 01에 잔존하는 최외각 부위 즉, 벌채연도에 가장 근접한 부분에 대한 연대가 된다

Figure 5. Profiles of probability distributions of radiocarbon dates for 2 individual tree-rings after wiggle matching of BSMG 01(black colored).

Figure 6. Profiles of probability distributions of radiocarbon dates for 2 individual tree-rings after wiggle matching of BSMG 06(black colored).

(Table 3). 또한 BSMG 06의 연륜시료 2개에 대하여 위글매치를 이용한 분석결과(n=2), 전체 일치도 A=105.1%이며, 수용한계(5% 유의수준) An은 50.0%이므로 χ^2 검정을 만족하였다(Figure 6). BSMG 06의 마지막 측정시료인 61번째 연륜에 대한 95.4% 신뢰구간이 AD 460~570년으로 계산되었다. 따라서 시료에 잔존하는 최외각 연륜은 AD 460~570년 사이에 형성된 것으로 95.4% 확신할 수 있으며, 이 연대 구간이 BSMG 06에 잔존하는 최외각 부위 즉, 벌채연도에 가장 근접한 부분에 대한 연대가 된다(Table 3).

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 서천 봉선리 유적에서 출토된 목곽고 부

Table 3. The results of radiocarbon dating before and after wiggle matching

ID	Tree rings used to wiggle match	BP (yrBP $\pm 1\sigma$)	Calibrated date before wiggle match(95.4%, C.I.)	Calibrated date after wiggle match(95.4%, C.I.)
BSMG 01	25-30th	1540 ± 40	420AD (95.4%) 610AD	-
	35-40th	1580 ± 30	410AD (95.4%) 550AD	430AD (95.4%) 550AD
BSMG 06	2th	1550 ± 40	410AD (95.4%) 600AD	-
	59-61th	1570 ± 30	410AD (95.4%) 560AD	460AD (95.4%) 570AD

Figure 7. The results of common date after wiggle matching

재들을 대상으로 방사성탄소연대 측정을 실시하여 목곽고가 제작된 정확한 연대를 확인하고자 하였다. 총 3점의 부재들을 대상으로 진행하였으며, 그 중 다수의 연륜이 관찰되는 2점(BSMG 01, BSMG 06)을 선별하여 위글매치를 이용한 방사성탄소연대측정을 실시하였다.

2점의 부재들에 대한 위글매치 분석 결과, BSMG 01의 최외각 연륜에 대한 연대 구간이 95.4% 신뢰구간에서 AD 430~550년으로 산출되었으며, BSMG 06의 최외각 연륜은 AD 460~570년으로 확인되어 개별로 측정된 시료들의 연대구간에 비해 다소 오차구간을 줄일 수 있었다. 또한 BSMG 01과 BSMG 06의 겹치는 구간은 AD 460~550년 사이로 확인되었으며, 수피가 존재하는 BSMG 12의 연대구간을 비교한 결과 공통되는 연대구간은 AD 490~510년으로 오차구간이 20년으로 감소하였다(Figure 7). 따라서 3개의 부재들이 같은 시기에 별채되어 목곽고에 사용되었다면 서천 목곽고는 AD 490~510년 사이에 별채한 목재를 이용하여 제작한 것으로 판단할 수 있다.

2017년 5월에 종료된 서천 봉선리 2차 발굴조사에서 목곽고가 출토된 토층의 대지조성 흔적 및 구획시설 토축부의 축조방법으로 약 5세기를 전후한 시점을 목곽고의 제작 시기로 판단하였다(Chungnam Institute of History and Culture, 2017). 이는 목부재에서 확인한 연대인 AD 490~510년, 즉 5세기 후반에서 6세기 초의 결과와 일치하는 것으로 위글매치를 이용한 방사성탄소연대측정 결과의 정확성을 확인할 수 있는 결과이다.

사 사

본 연구는 2016년에 충청남도 서천군에서 발주한 서천 봉선리 유적 목곽고 보존처리 사업의 일환으로 이루어졌다.

REFERENCES

Chungnam Institute of History and Culture, 2016, The data

- book of field presentation for Excavation(1st) of Bongsoen-ri, Seochun. (in Korean)
- Chungnam Institute of History and Culture, 2017, The summary report for excavation(2st) of Bongsoen-ri, Seochun. (in Korean)
- Jeong, A.R., 2011, Species identification and dating for wooden walls excavated from Bangu-dong site, Ulsan, Korea. Master's thesis, Chungbuk National University, Cheongju. (in Korean with English abstract)
- Jwa, Y.J., Lee, J.I. and Zheng, X., 2003, A study on the eruption ages of Baekdusan: 1. Radiocarbon(¹⁴C) age for charcoal and wood samples. Journal of the Geological Society of Korea, 39, 347-357. (in Korean with English abstract)
- Nam, T.G., Kim, T.J. and Moon, H.S., 2015, Radiocarbon dating of a wooden board from Yeongheung-do shipwreck using wiggle matching of decennial tree-ring samples. Journal of Conservation Science, 31(3), 279-285. (in Korean with English abstract)
- Park, W.K., Kim, Y.J., Kim, S.K., Youn, M.Y. and Kim, S.K., 2010, Tree-ring dating and radiocarbon dating of Sungryemun signboard. Proceeding of the 31th National Conference of the Korean Society of Conservation Science of Cultural Heritage, 82-85. (in Korean with English abstract)
- Park, W.K., Kim, Y.J., Lee, J.H. and Seo, J.W., 2001, Development of tree-ring chronologies of Pinus densiflora from Mt. Sorak and dating the year of construction of the Kyunghoe-ru Pavilion in Seoul. Journal of the Korean Physical Society, 39(4), 790-795. (in Korean with English abstract)
- Ramsey, B.C., van der Plicht, J. and Weninger, B., 2001, Wiggle matching radiocarbon, dates. Radiocarbon 43, 381-389.
- Schweingruber, F.H., 1983, Tree rings. D. Reidel Publishing Company, 144-165.