

위글매치를 이용한 백제 풍납토성 화재주거지 출토 탄화목의 방사성탄소연대 측정

송지애 | 손병화* | 박원규**¹

국립문화재연구소 문화재보존과학센터, *충북대학교 목재연료소재은행, **충북대학교 목재·종이과학과

Wiggle Matched Radiocarbon Dates of Charcoal in a Fired Dwelling Excavated at the Pungnapdoseong Earthen Wall, Baekje

Ji-Ae Song | Byung-Hwa Son* | Won-Kyu Park**¹

Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

*Tree-Ring Material Bank, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

**Department of Wood and Paper Science, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

¹Corresponding Author: treering@cbnu.ac.kr, +82-43-261-2643

초록 이 연구의 목적은 백제 풍납토성 화재주거지(라-8호)에서 출토된 탄화목의 방사성탄소연대 분석을 통하여 풍납토성의 축조연대를 규명하는 것이다. 탄화목에서 10년 간격으로 채취된 6개의 연륜에 대한 방사성탄소연대를 위글매치한 결과, 최외각 연륜의 $\pm 2\sigma$ 연대(95.4% 신뢰구간)가 A.D. 190~280년으로 산출되어 이 주거지가 3세기 초중반에 형성된 것을 알 수 있었다. 이 연대는 주거지 형태와 토기양식으로 추론된 고고학적 편년과 일치되는 결과이다.

중심어: 방사성탄소연대, 위글매치, AMS, 탄화목, 풍납토성

ABSTRACT The purpose of this study was to analyze AMS radiocarbon dating, using wiggle match, of a charcoal column excavated from a fired dwelling site (ra-#8) at the Pungnapdoseong earthen wall made in Baekje era. The result of wiggle matching for 6 decadal single-ring samples of the charcoal produced $\pm 2\sigma$ radiocarbon date (95.4% confidence interval) as A.D. 190~280. It indicated that the dwelling site (ra-#8) belonged to the early and middle of the 3rd century. Radiocarbon dating results confirmed the date speculated by archaeologists according to dwelling structure and pottery style.

Key Words: Radiocarbon dating, Wiggle-match, AMS, Charcoal, Pungnapdoseong earthen wall

1. 서론

목재를 통해 연대를 측정하는 방법에는 나이테 분석을 이용한 연륜연대법과 방사성탄소 (^{14}C)의 반감기를 이용하

는 방사성탄소연대측정법이 있다. 방사성탄소연대측정법은 1950년대에 Libby에 의해 알려진 후 세계적으로 널리 이용되고 있는 절대연대측정법으로 유기물 속에 함유된 방사성탄소의 농도를 측정하고 ^{14}C 의 반감기를 이용하여 연

대를 계산하는 것으로 고고학에서 뿐 아니라 지질학, 해양학, 환경학 등 여러 분야에서 널리 응용되고 있다.

방사성탄소연대는 대기 중 방사성탄소농도 변동, 지구지자기 변동, 해양의 영향, 식물 내에서의 분별작용(fractionation) 등으로 오차가 발생한다. 이러한 오차는 정확히 연대 측정된 표준물질 특히 나이테의 자료로 작성된 보정곡선으로 보정이 가능하다. 그러나 이 보정도 한계가 있어 태양활동과 지구지자기변동으로 생기는 위글(wiggle)이라 불리는 단주기의 변동은 극복하기가 어렵다. 최근에는 유물의 일정한 간격의 나이테를 연속적으로 방사성탄소연대를 측정하고 그 결과를 방사성탄소보정곡선의 위글(wiggle)에 맞추어 방사성탄소연대의 오차를 줄여줄 수 있는 ‘wiggle matching’ 법이 적용되고 있다¹. 국내에서 위글매치를 실시한 예로는 승례문 현판², 울산 반구동 목책시설³과 종묘광장 회동제생동 천 및 시전 행랑유구⁴ 및 백두산의 화산분출 연대⁵ 등이 있다.

풍납토성은 한강변 초기 백제시기의 토축 성곽으로 주변의 몽촌토성과 석촌동 고분군과 관련되어 역사적으로 매우 가치 있는 곳이다⁶⁻⁸. 그동안 풍납토성에서 출토된 유물에 대한 방사성탄소연대 측정을 90여점 이상 측정하였지만 오차구간이 150년 내지 300년에 이르러 유물의 편년을 확정하는 데 어려움이 있어왔다⁹⁻¹¹.

본 연구에서는 방사성탄소연대 오차구간을 줄이기 위하여 풍납토성의 화재주거지(라-8호주거지)에서 출토된 탄화목(국립문화재연구소 고고연구실 발굴)의 연대를 위글매치를 이용하여 측정함으로써 주거지 형태와 출토 토기의 양식으로 추정된 편년과 비교 검토하고자 하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

본 연구에서 조사된 지역은 서울특별시 송파구 풍납동 197번지 일대로 풍납토성 중 유실된 서벽 안쪽에 위치하며 경당지구 남서편에 위치한다. 주로 지표하 약 2m 깊이에서 백제시대 문화층이 확인되며, 문화층은 약 60~120cm의 두께를 가진다¹¹. 주거지 라-8호는 화재로 인해 폐기된 평면凸자형주거지로 출입구가 동편에 시설되어 동서방향을 장축으로 한 유구이다(Figure 1-a). 주거지 내부에는 벽체 혹은 지붕에서 무너진 것으로 추정되는 탄화목과 지붕에 사용된 것으로 추정되는 탄화 초분류가 출토되었으며, 탄화목 중에는 목재결구가 남아있는 형태도 확인되었다. 수종을 분석한 결과, 91%가 상수리나무아속 상수리나무류로



(a) Fired dwelling site (arrow: sampled charcoal)



(b) charcoal sample



(c) cross section of charcoal

Figure 1. Fired dwelling site(ra-#8) and charcoal sample at the Pungnapdoseong Earthen Wall.

Table 1. The results of radiocarbon dating before and after wiggle matching.

Measured Ring No.	¹⁴ C dates (before calibration)		95.4% C.I. before wiggle match		95.4% C.I. after wiggle match	
	BP (before present)	Standard deviation	Interval(A.D.)	Span(Years)	Interval(A.D.)	Span(Years)
3rd	1790	±50	120 ~ 392	272	120 ~ 210	90
13th	1820	±50	70 ~ 340	270	130 ~ 220	90
23th	1760	±50	130 ~ 390	260	140 ~ 230	90
33th	1870	±50	20 ~ 260	240	150 ~ 240	90
43th	1790	±50	120 ~ 390	270	160 ~ 250	90
53th	1820	±50	70 ~ 340	270	170 ~ 260	90

*C.I. : confidence interval

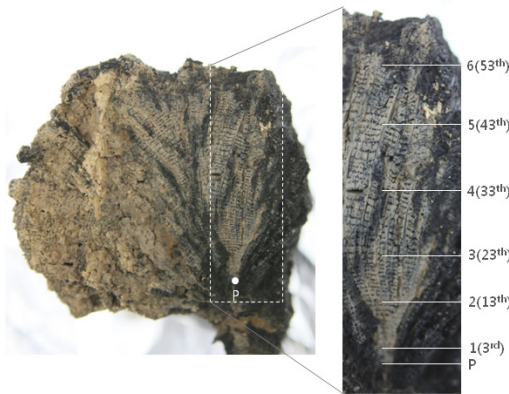


Figure 2. Sampled rings in charcoal for wiggle matching (P: pith).

분석되었으며, 탄화 초본류는 대나무아과로 분석되었다¹². 본 연구의 대상은 라-8호 주거지에서 출토된 탄화목 중 나 이태가 다량 보유된 1점(수종: 상수리나무류, 총 연륜수 73 개)을 대상으로 하였다(Figure 1-b, c).

2.2. 시료채취 및 방사성탄소연대 측정

연구대상인 탄화목의 연륜을 실제현미경으로 관찰하며 수(pith)로부터 3번째 연륜으로부터 10년 간격으로 6개의 연륜에서 50 ~ 100mg 정도씩 시료를 채취하였다 (Figure 2). 시료는 표면이 부서지는 상태로 정확한 최외각 나이테를 추정하기 어려웠으므로 연륜이 잘 보이는 수로부터 연륜을 측정하여 시료를 채취하였다. 산-알카리-산(AAA)으로 전 처리한 탄화목 시료를 산화구리(CuO)를 첨가하여 850°C 에서 연소시켜 이산화탄소로 변환후 graphite를 만들어 알 루미늄 타겟을 제작하였다. 방사성탄소연대는 서울대학교

기초과학공동기기의 가속질량분석기 (Accelerator Mass Spectrometer/4130 -Tandetron AMS/MPS)를 이용하여 측정하였다.

측정된 각 시료의 방사성탄소연대를 가장 오래된 연륜 (즉, 수로부터 3번째 연륜)의 것부터 순서대로 정렬한 후, IntCal04 보정곡선이 적용된 OxCal3.2 프로그램¹³의 D_Sequence 옵션을 이용하여 위글매치를 실시하였다. 위글매치는 각 시료들의 방사성탄소연대에 대한 Gaussian 확률분포를 연대 차이(본 연구에서는 10년)에 대한 정보를 활용하여 Bayesian 통계로 분석함으로써 이루어진다¹. 위글매치의 유의성 검정은 전체 일치도(A: overall agreement)와 수용한계(An: acceptability threshold)를 비교하는 χ^2 (카이제곱)검정으로 실시하였다.

3. 결 과

탄화목에서 채취한 6개 연륜에 대한 방사성탄소연대 측정결과를 위글매치 前과 後로 나누어 Table 1에 나타내었다. 위글매치를 분석한 결과, 전체일치도 A=101.0%가 수용한계(5% 유의수준) An=28.9%를 크게 상회하여 χ^2 검정을 만족시켰다(Figure 3).

위글매치 전의 개별 연륜에 대한 방사성탄소연대 확률분포를 Figure 5에 나타내었다. 95.4% 신뢰구간 폭이 240 ~ 272년에 달하고 얻어진 보정연대가 AD 20년부터 AD 392년에 이르러 연대에 대한 의미있는 해석이 어려웠다. 그러나 위글매치 후에 오차구간이 상당히 좁아진 것을 Figure 4 (흑색으로 표시된 확률분포)에서 확인할 수 있다. 위글매치 후 95.4% 신뢰구간 폭이 90년으로 줄어들었다.

위글매치된 연륜중 마지막 ब्ल록인 53번째 연륜에 대한 95.4% 신뢰구간이 A.D. 170 ~ 260년으로 측정되었다

(Figure 5). 탄화목의 6개 연륜에 대한 방사성탄소연대 측정결과를 보정곡선의 위글에 일치(match)시키어 Figure 6에 나타내었다. 이 탄화목은 수피의 존재가 확인되지 않았

으며, 방사성탄소가 측정된 마지막 연륜(53번째) 이후에도 20개의 나이테가 더 있는 것으로 확인되었다. 따라서 이 탄화목의 잔존 최외각 연륜에 대한 95.4% 신뢰구간은 A.D.

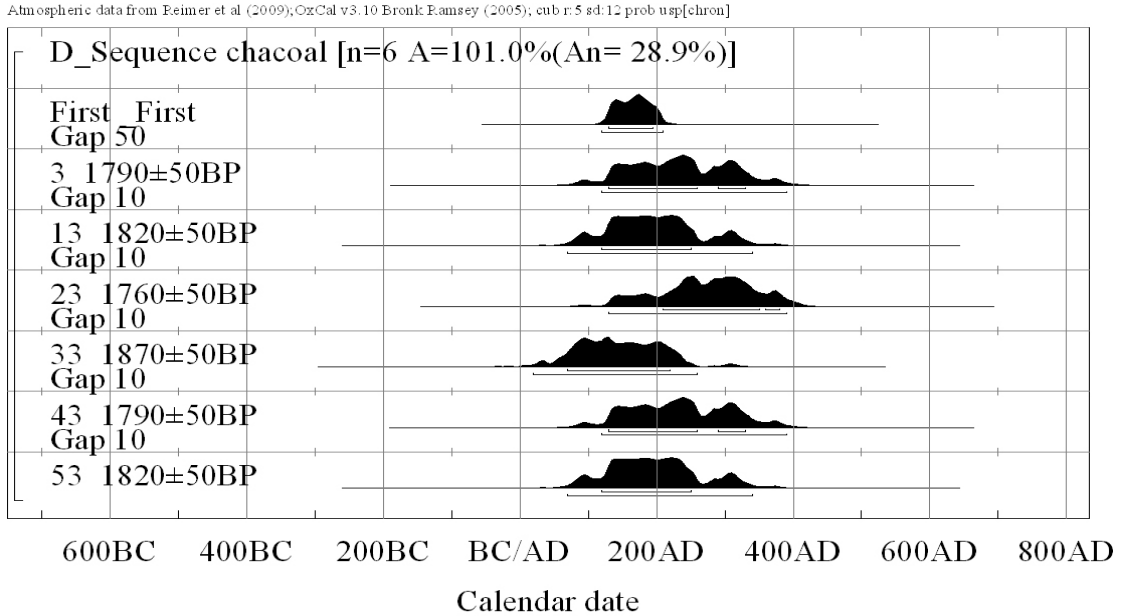


Figure 3. Profiles of probability distributions of radiocarbon dates for six individual rings prior to wiggle matching: the gaps are the spans (years or rings) between two consecutive AMS samples, that are used in D_sequence sub-routine of OxCal program. The 'First' profile represents the probability distribution of the first AMS sample, i.e., 3rd ring after wiggle matching.

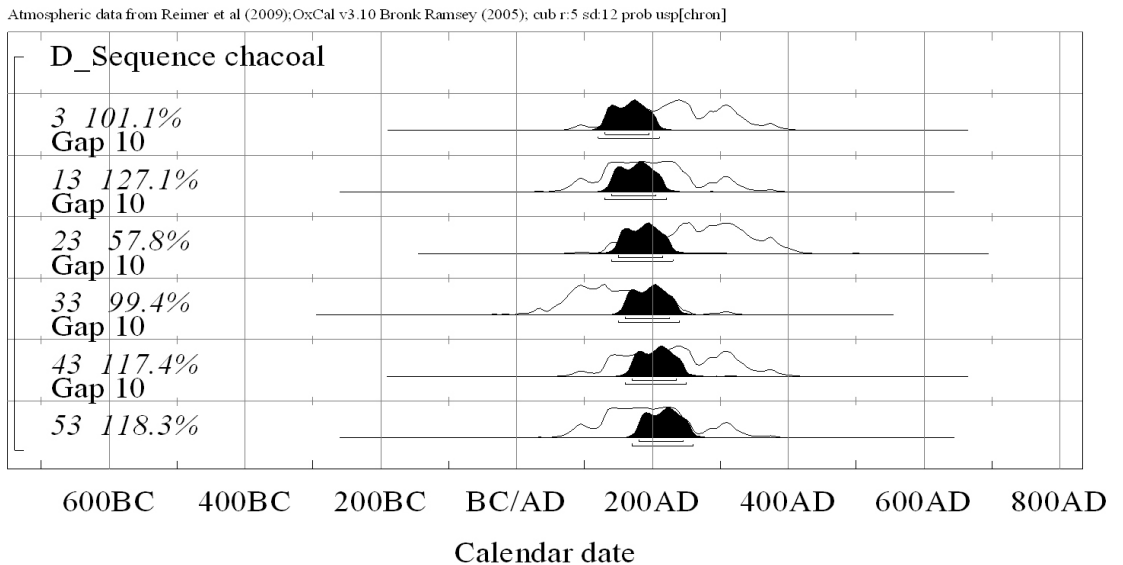


Figure 4. Profiles of probability distributions of radiocarbon dates for 6 individual rings after wiggle matching(black colored); those of prior to wiggle matching are shown in white colored profiles. Upper bars indicate the 68.2% ($\pm 1\sigma$) confidence interval and lower bars indicate the 95.4% ($\pm 2\sigma$) confidence intervals.

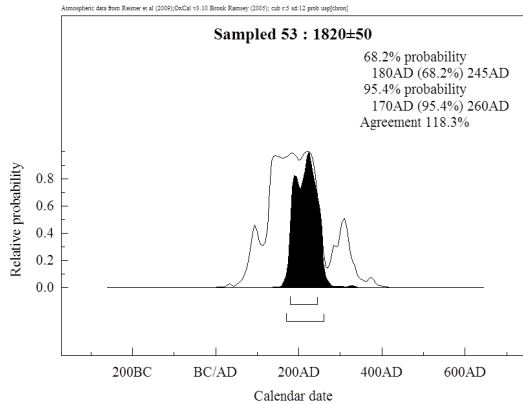


Figure 5. Profiles of probability distributions of radiocarbon dates for the 53rd ring; before wiggle matching (white area) and after wiggle matching (black area).

190~280년으로 산출되었다.

4. 고찰 및 결론

풍납토성 라-8호 주거지에서 출토된 탄화목의 53번째 연륜에 대한 방사성탄소연대를 단독 측정하였을 때는 95.4% 신뢰구간이 AD 70~340년(구간폭: 270년)이었다(Table 1). 10년 간격으로 채취된 6개 연륜에 대한 방사성탄소연대를 위글매치하였을 때는 53번째 연륜에 대한 95.4% 신뢰구간이 A.D. 170~260년(구간폭 90년)으로 산출되었다(Table 1). 위글매치에 의해 얻어진 구간폭 90년은 개별 측정시 얻어진 구간폭 270년을 1/3로 줄여준 결과이다.

그런데 위글매치를 하면 보통 95.4% 신뢰구간 구간폭이 20년 내지 30년으로 줄어드는 다른 연구^{4,14}에 비하면 본 연구에서 얻어진 구간폭(90년)은 큰 편이다. 이것은 보정곡선에서 AD 130~220년 구간이 평평한 소위 ‘지평선’ 구간이기 때문에(Figure 6), 연속시료로도 보정곡선의 위글에 꼭 맞출 수 없었기 때문으로 생각된다. 이러한 ‘지평선’ 구간이 포함된 위글매치는 목재유물이 많은 연륜을 가지고 있어 긴 기간에 걸친 위글매치를 함으로써 ‘지평선’ 구간이외에 ‘대각선’ 기간도 포함되어야 오차를 줄여줄 수 있다¹⁴. 그러나 ¹⁴C 연대 값들이 보정곡선의 ‘지평선’ 구간에 속하게 되면 위글매치를 하더라도 오차를 크게 줄여줄 수는 없다. 이러한 불리한 여건에서도 본 연구에서 위글매치를 이용하여 방사성탄소연대 오차를 1/3로 줄일 수 있었던 것은 큰 성과라 할 수 있다.

지금까지 풍납토성의 축조시기는 대부분 문헌자료와 고

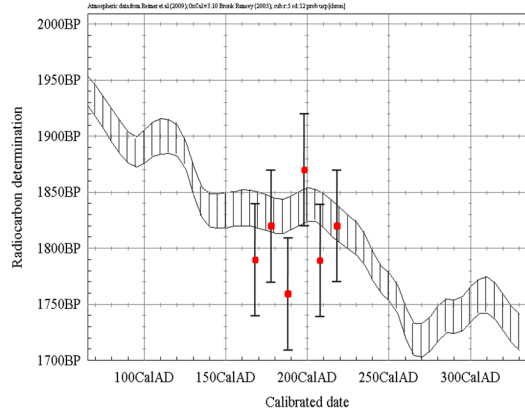


Figure 6. Schematic diagram showing AMS wiggle matching 6 decadal rings to the radiocarbon calibration curve.

고학적 유구와 유물, 특히 토기를 이용하여 분류되어왔다^{6,7,8,11}. 그러나 풍납토성 축조 연대는 많은 논쟁의 대상이 되어왔으며¹⁰, 최근 국립문화재연구소에서 추가 발굴조사가 진행됨에 따라 그 결과가 주목되고 있는 시점이다. 풍납토성 유적지의 과학적 연대측정은 2001년 출토된 유물 10점에 대한 방사성 탄소연대 측정과 토기 2점에 대한 열발광 연대 측정을 통해 시도되었다⁹. 그 결과 중 풍납토성 내부에서 출토된 목탄의 방사성탄소연대가 B.C. 1세기부터 A.D. 3세기에 걸쳐 있어 연대해석에 큰 어려움이 있었다¹¹. 이후 풍납토성 유물에 대한 방사성탄소연대측정이 꾸준히 실시되고 있음에도 불구하고 오차구간이 커서 최근까지 고고학계에서는 방사성탄소연대측정 결과치가 적극적으로 인용되지 못하고 있다¹¹.

이번 연구가 풍납토성 유물에 대한 첫 번째 위글매치 시도이었다. 위글매치 결과, 라-8호 주거지에서 출토된 목탄의 최외각 연륜에 대한 방사성탄소연대가 A.D. 190~280년(95.4% 신뢰구간)으로 산출되어 이 주거지는 3세기 초중반에 형성된 것으로 해석되었다. 고고학적으로도 라-8호 주거지는 철(凸)자형 주거지에 노지와 일자형 부뚜막이 함께 나오고 중도식 무문토기(無文土器)가 다량 출토되었으며, 타날문토기(打捺文土器)가 많지 않다는 점에서 3세기 초중반대의 양상을 보여준다고 해석된 바 있다¹¹. 따라서 이번 연구결과는 주거지 형태와 토기를 통해 얻어진 고고학적 편년을 과학적으로 지지해 주었다.

풍납토성 출토 목재나 탄화목의 연대를 제시하기 위해 그동안은 방사성탄소연대를 대부분 단독시료로만 측정해왔기

때문에 오차범위가 커서 연대해석에 제한이 따랐으나 본 연구에서는 위글매치 방법을 적용하여 오차범위를 상당히 줄일 수 있었다. 이번 연구를 계기로 위글매치를 통한 더 많은 자료 축적이 이루어진다면 앞으로 풍납토성을 위시한 다양한 삼국시대 유적의 편년을 밝혀내는 계기가 될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구에 사용된 목탄시료를 제공해주고 현장 도면을 보내주신 국립문화재연구소 고고연구실 한지선 선생님과 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Bronk Ramsey, C., van der Plicht, J. and Weninger, B., "Wiggle matching radiocarbon dates". *Radiocarbon*, **43**, p381-389, (2001).
2. National Research Institute of Cultural Heritage, "Conservation Treatment of the South Gate Signboard of Seoul". (2009).
3. Jeong, A.R., "Species Identification and Dating for Wooden Walls Excavated from Bangu-dong site, Ulsan, Korea". Master thesis, Chungbuk National University, (2011).
4. Nam, T.K., "Species Identification and Dating for the Woods Excavated from Jongmyo Square, Seoul, Korea". Master thesis, Chungbuk National University, (2012).
5. Jwa, Y.J., Lee, J.I. and Zheng, X., "A study on the eruption ages of Baekdusan: 1. Radiocarbon (^{14}C) age for charcoal and wood samples". *Journal of the Geological Society of Korea*, **39**, p347-357, (2003).
6. National Research Institute of Cultural Heritage, "Pungnapdoseong Earthen Wall I", (2001).
7. National Research Institute of Cultural Heritage, "Pungnapdoseong Earthen Wall VIII", (2007).
8. National Research Institute of Cultural Heritage, "Pungnapdoseong Earthen Wall XI", (2009).
9. Kang, H.T. and Na, K.I., "Absolute age determination of Pungnap-dong site in Seoul". *Korean Ancient Historical Society*, **34**, p81-102, (2001).
10. Sin, H.K., "Preliminary study on archaeological date of Pungnapdoseong". *Korean Ancient Historical Society*, **37**, p29-51, (2002).
11. National Research Institute of Cultural Heritage, "Research on the Standardization of Classification to Baekjae Potteries in the Hanseong Area", (2011).
12. Song, J.A., "Identification of carbonization organic in fired dwelling excavated at the Pungnapdoseong, Baekje". *Journal of Korean Traditional Cultural Heritage*, **9**, p130-140, (2011).
13. Bronk Ramsey, C., "Development of the radiocarbon program OxCal". *Radiocarbon*, **43**, p355-363, (2001).
14. Nam, T.K., Park, J.H., Hong, W. and Park, W.K., "Radiocarbon dating of a wooden board from Jeongsusa Temple using wiggle matching of quinquennial tree-ring samples". *Journal of Conservation Science*, **28**, p1-5, (2012).