

위글 매치를 이용한 마도4호선의 방사성탄소연대 측정

남태광¹ | 홍광희* | 이지희*

국립경주문화재연구소 학예연구실, *국립해양문화재연구소 수중발굴과

Radiocarbon Dating of a Wooden Board from Mado Shipwreck No. 4 Using Wiggle Matching

Tae Gwang Nam¹ | Kwang Hui Hong* | Ji Hee Lee*

Curatorial Affairs Divison, Gyeongju National Research Institute of Cultural Heritage, Gyeongju, 38170, Korea

*Underwater Excavation & Conservation Divison, National Research Institute of Maritime
Cultural Heritage, Mokpo, 58699, Korea

¹Corresponding Author: tour9317@hotmail.com, +82-54-777-6388

초 록 이 연구의 목적은 충청남도 태안군 근흥면 마도에서 발굴된 마도4호선의 목부재와 곡물의 방사성탄소연대 분석을 통해 고선박의 연대를 규명하는 것이다. 선미판재에서 10년 간격으로 채취된 4개의 연륜에 대한 방사성탄소연대를 위글 매치한 결과, 최외각 연륜의 $\pm 2\sigma$ 연대(95.4% 신뢰구간)에서 A.D. 1337-1356년 또는 A.D. 1412-1429년으로, 곡물은 A.D. 1415-1455년으로 산출되어 이 고선박은 15세기 초중반에 난파되었음을 시사한다. 이 연대는 선박의 구조, 자기의 양식으로 추론된 고고학적 편년과 일치되는 결과이다.

중심어: 방사성탄소연대, 위글 매치, AMS, 마도4호선

ABSTRACT The purpose of this study was to carry out radiocarbon dating using a wiggle match, of wooden boards and grains from the Mado shipwreck No. 4, which was excavated from Mado in Taean-gun, Chungcheongnam-do. The result of the wiggle matching for four decennial tree-ring samples of the stern plank produced a $\pm 2\sigma$ radiocarbon date (95.4% confidence interval) of A.D. 1337-1356 or A.D. 1412-1429. The grains produced a $\pm 2\sigma$ radiocarbon date (95.4% confidence interval) of A.D. 1415-1455. This indicated that the Mado shipwreck No. 4 belonged to the early or middle of the 15th century. These radiocarbon dating results correlate with the date that was speculated by archaeologists according to the ship's structure and ceramic style.

Key Words: Radiocarbon dating, Wiggle-match, AMS, Mado shipwreck No. 4

1. 서 론

주변에서 손쉽게 구할 수 있고 어떤 형태로든 자유롭게 제작이 가능한 재료인 목재는 인류의 역사와 함께 예로부터

가장 많이 사용되었다. 목재는 일상생활 용구로부터 건축재에 이르기까지 매우 다양하게 사용되어 그 용도를 파악하는데 많은 노력이 필요하다. 목재로 만들어진 유물에 대한 연구는 유물, 기록, 건축 등의 역사적 사료가 부족한

시기를 연구함에 있어 매우 중요한 자료가 된다. 목재로 제작된 유물은 당시 사람들의 생활상과 자연환경에 대한 다양한 정보를 가지고 있으며, 다양한 분석을 통해 얻어진 자료는 고고학적, 역사학적 해석을 통해 당시를 이해하는데 매우 중요하게 이용될 수 있다.

발굴된 목재유물의 분석 중 가장 중요한 것은 절대연대를 측정하는 것이다. 목재를 통해 연대를 측정하는 방법에는 나이테 정보를 해석하여 절대연대를 밝혀내는 연륜연대법이 있으며, 다른 방법으로는 방사성탄소연대측정법이 있다. 방사성탄소연대측정법은 방사성탄소(^{14}C)의 반감기를 이용한 방법으로 1950년대 Libby에 의해 알려진 후 세계적으로 널리 이용되고 있다.

자연계에 일정하게 분포되어 있던 방사성탄소인 ^{14}C 는 5,730년을 주기로 반감한다. 이러한 원리를 이용하여 유적에서 발굴되는 유기질 유물을 대상으로 방사성탄소농도를 측정함으로써 죽은 후 경과된 시간을 계산할 수 있게 된다. 측정된 방사성탄소연대는 대기 중 방사성탄소농도의 변동, 지구지자기의 변동, 해양의 영향, 식물 내에서의 분별작용(fractionation) 등으로 오차가 발생한다. 이러한 오차는 보정곡선(calibration curve)을 통해 실제 연대로 보정된다. 그러나 이 보정곡선에 의한 보정도 한계가 있어 태양활동과 지구지자기 변동으로 생기는 위글(wiggle)이라 불리는 단주기의 변동은 극복하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 하나의 대상에서 나이테 시료를 일정한 간격으로 여러 개를 연속적으로 측정함으로써 한 점(point)이 아닌 짧은 곡선을 만들어 보정곡선과 일치하는 정확한 절대연대를 찾아 방사성탄소연대의 오차(95.4% 신뢰구간)를 20~30년까지 줄여줄 수 있는 기법인 ‘위글 매치(wiggle match)’법이 최근 적용되고 있다(Ramsey *et al.*, 2001).

국내에서 위글 매치를 적용한 예로는 울산 반구동 목책시설(Jeong, 2011), 종묘광장 회동-제생동천(Nam, 2012), 풍납토성(Song *et al.*, 2012)등이 있으며, 해양에서 발굴, 인양된 고선박인 태안선, 마도3호선(Nam, 2013), 영흥도선(Nam *et al.*, 2015)에 적용되었다.

마도4호선은 2014년 충청남도 태안군 마도해역에서 발견된 후 2015년 발굴 조사되었다. 마도해역에서는 지난 2009~2011년까지 3척의 고선박이 발굴되었다. 발굴된 3척의 고선박 중 마도1, 2호선은 선체를 인양하였으나, 마도3호선은 발굴조사 후 선박 속의 유물은 출수하고 선체는 인양되지 않았다. 본 연구의 대상인 마도4호선도 발굴조사 후 유물과 일부 선체부재를 수습한 후 선체에 대한 조사를

진행하고 재매장되었다. 발굴조사로 분청사기 155점, 도기 8점, 목간 63점, 목제품 72점 등의 유물이 출수되었다.

본 연구에서는 출수된 선체부재와 곡물류를 자연과학적인 연대분석을 실시하여 선박의 구조, 목간의 내용 그리고 도자기의 양식으로 추정된 편년과 비교 검토하고자 하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

본 연구에서는 마도4호선의 발굴조사 중 출수된 선체부재 2점(선미판재 2단, 괴임목)과 선체내부에서 출수된 곡물류 1점, 그리고 선체 근처(약 25 m)에서 2014년에 출수된 닻가지 1점을 대상으로 연대분석을 실시하였다.

연구 전 조사로 수중분석을 실시하여 선미판재 2단과 괴임목은 소나무과 소나무속 경송류, 닻가지는 참나무과 참나무속 상수리나무아속 상수리나무류로 식별되었으나, 곡물류는 동정되지 않았다.

2.2. 시료채취 및 방사성탄소연대 측정

연구대상인 선체편의 각 부재들은 부후가 상당히 진행되고, 얇은 판재로 가공되어 있어 생장추를 이용한 시료채취는 용이하지 않았으며, 부재에서 시료를 미량 채취하여 분석에 사용하였다. 각 부재에서는 수피의 흔적을 찾을 수 없었으며, 가장 오염되지 않은 부분에서 최외각 연륜을 채취하였다. 대상시료 중 괴임목과 닻가지에서는 최외각에

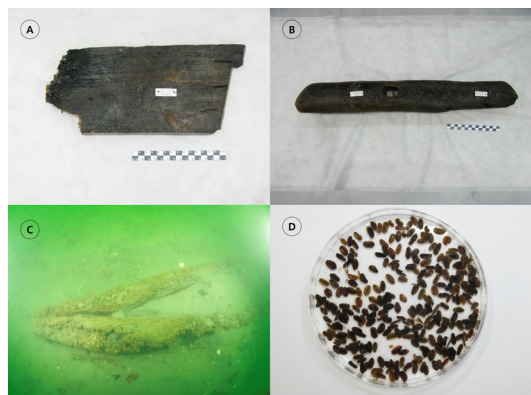


Figure 1. Mado shipwreck No. 4. (A) Stern plank, (B) Wooden support, (C) Arms of anchor(Underwater photograph), (D) Outer husks of grain.

서 연륜 2개를 포함되도록 채취하였고, 곡물류는 개흙과 함께 출수되어 세척과 선별 후 채취하였다. 선미판재 2단은 연륜(나이테)을 66개가 확인되었다(Figure 1).

향후 진행될 연륜연대 분석을 위해 선미판재 2단에서 채취한 시료는 연륜폭 측정기(Lintab 5)와 연륜폭 측정프로그램(Tsap-Win)을 사용하여 0.01 mm 정확도로 나이테의 폭을 측정하였다(Figure 2). 선미판재 2단에서 채취한 시료는 위글 매치 분석을 위해 연륜폭 측정을 통해 10년 단위로 연속되게 연륜 1개씩 채취한 후 4개(10년, 20년, 30년, 40년)를 측정 의뢰하였다(Figure 3). 각 시료는 150~500

mg으로 제작하였다(Table 1, 2).

방사성탄소연대 측정은 신뢰성과 교차검정을 위해 Paleo Labo사(일본)와 BETA 연구소(미국)에 동일한 시료를 측정 의뢰하였다. 시료의 전처리에는 산-알칼리-산(AAA)법으로 진행되었다.

위글 매치 분석은 가장 최근의 보정곡선(IntCal 13)을 적용하여 Oxcal 프로그램의 Dendro Wiggle Match 기능으로 분석을 실시하였다(Ramsey and Lee, 2013). 위글 매치는 각 시료들의 방사성탄소연대에 대한 Gaussian 확률 분포를 보정 프로그램에서 Bayesian 통계 분석법으로 보

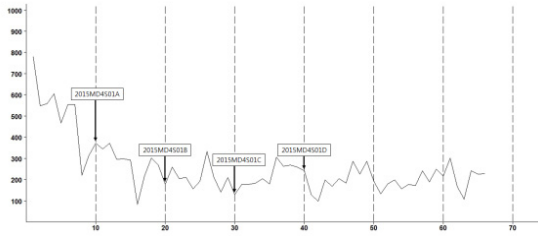


Figure 2. Tree-ring width graph of stern plank for wiggle matching(X-axis: tree-ring number, Y-axis: tree-ring width × 100 mm).

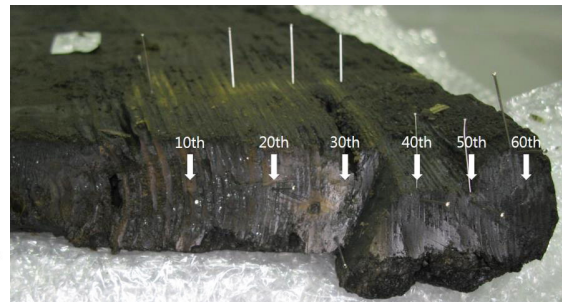


Figure 3. Sampled tree-rings in stern plank for wiggle matching.

Table 1. The list of samples I (Paleo Labo Co., Ltd., Japan)

Sample	Number	Measured tree-ring No.	Weight (mg)	Tree-ring	Remark
Stern plank	2015MD4S01A	10th	200	1	pith
	2015MD4S01B	20th	200	1	↓
	2015MD4S01C	30th	150	1	
	2015MD4S01D	40th	150	1	bark
Wooden support	2015MD4S02A	Outermost	400	2	
Arms of anchor	2015MD4S03A	Outermost	400	2	
Outer husks of grain	2015MD4S04A	-	500	-	

Table 2. The list of samples II (BETA Analytic Inc., USA)

Sample	Number	Measured tree-ring No.	Weight (mg)	Tree-ring	Remark
Stern plank	2015MD4S01	66th	200	1	
Wooden support	2015MD4S02	Outermost	400	2	
Arms of anchor	2015MD4S03	Outermost	400	2	
Outer husks of grain	2015MD4S04	-	500	-	

정연대 확률분포를 계산하기 위하여 이 시료들의 실제 연대순서와 차이(gap: 10년 간격)에 대한 정보를 활용하여 위급 매치 분석을 하면 매우 정확한 보정연대 확률분포를 산출해 낼 수 있다(Ramsey *et al.*, 2001). 유의성 검정은 확률분포에서 전체 일치도(A : overall agreement)와 수용한계(An : acceptability threshold)를 비교하는 χ^2 (카이제곱) 검정으로 실시하였다.

3. 연구결과

3.1. 방사성탄소연대 측정 결과

마도해역에서 4번째로 발굴 조사된 마도4호선의 방사성탄소연대 측정 결과를 다음 Table 3과 4에 나타내었다. 선미판재 2단의 방사성탄소연대 측정 결과, ¹⁴C 보정연대

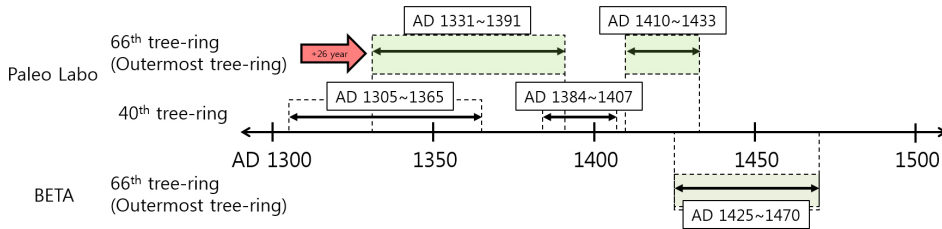


Figure 4. The result comparison of radiocarbon dating for outermost tree-ring(66th).

Table 3. The results of radiocarbon dating I(Paleo Labo Co., Ltd., Japan)

Sample	Number	¹⁴ C dates (before calibration)		Calibrated dates (A.D., 95.4% C.I.**)	Remark
		BP*	Standard deviation		
Stern plank	2015MD4S01A	664	19	1281-1312 1358-1388	pith ↓ bark
	2015MD4S01B	638	18	1289-1320 1350-1392	
	2015MD4S01C	647	18	1285-1319 1352-1391	
	2015MD4S01D	594	18	1305-1365 1384-1407	
Wooden support	2015MD4S02A	465	18	1420-1450	
Arms of anchor	2015MD4S03A	505	18	1408-1439	
Outer husks of grain	2015MD4S04A	492	18	1413-1442	

*BP : before present, the year from A.D. 1950

**C.I.: confidence interval

Table 4. The results of radiocarbon dating II(BETA Analytic Inc., USA)

Sample	Number	¹⁴ C dates (before calibration)		Calibrated dates (A.D., 95.4% C.I.)	Remark
		BP	Standard deviation		
Stern plank	2015MD4S01	440	30	1425-1470	
Wooden support	2015MD4S02	420	30	1435-1490 1605-1610	
Arms of anchor	2015MD4S03	520	30	1330-1340 1395-1440	
Outer husks of grain	2015MD4S04	460	30	1415-1455	

가 95.4% 신뢰구간에서 일본 Paleo Labo사에서 측정된 40 번째 연륜은 AD 1305-1365년 또는 1384-1407년으로 측정되어 최외각 연륜인 66번째 연륜은 AD 1331-1391년 또는 1410-1433년으로 산출되었고, 미국 BETA 연구소에서 측정된 66번째 연륜은 AD 1425-1470년의 연대 구간으로 산출되었다(Figure 4).

괴임목의 경우, 95.4% 신뢰구간에서 일본 Paleo Labo사는 AD 1420-1450년, 미국 BETA 연구소는 AD 1435-

1490년 또는 AD 1605-1610년의 연대 구간으로 산출되었다. 곡물류의 경우, 95.4% 신뢰구간에서 일본 Paleo Labo사는 AD 1413-1442년, 미국 BETA 연구소는 AD 1415-1455년의 연대 구간으로 산출되었다. 닻가지의 경우, 95.4% 신뢰구간에서 일본 Paleo Labo사는 AD 1408-1439년, 미국 BETA 연구소는 AD 1330-1340년 또는 AD 1395-1440년의 연대 구간으로 산출되었다(Table 3, 4).

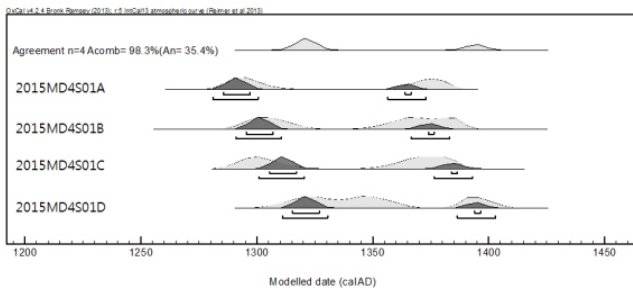


Figure 5. Profiles of probability distributions of radiocarbon dates for 4 individual tree-rings after wiggle matching(black colored).

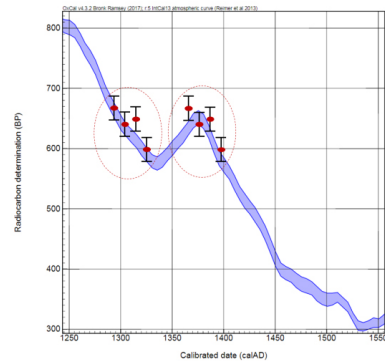


Figure 6. Schematic diagram showing AMS wiggle matching for 4 decennial tree-ring of Mado shipwreck No. 4.

Table 5. The results of radiocarbon dating before and after wiggle matching

Sample	Number	Measured tree-ring No.	14C dates (before calibration)		Calibrated dates before wiggle match (A.D., 95.4% C.I.)	Calibrated dates after wiggle match (A.D., 95.4% C.I.)
			BP	Standard deviation		
Stern plank	2015MD4S01A	10th	664	19	1281-1312 1358-1388	1281-1300 1356-1373
	2015MD4S01B	20th	638	18	1289-1320 1350-1392	1291-1310 1366-1383
	2015MD4S01C	30th	647	18	1285-1319 1352-1391	1301-1320 1376-1393
	2015MD4S01D	40th	594	18	1305-1365 1384-1407	1311-1330 1386-1403

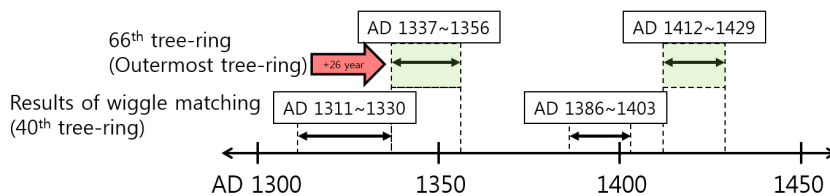


Figure 7. The results of wiggle matching for stern plank(outermost tree-ring).

3.2. 위글 매치 분석 결과

본 연구의 대상인 마도4호선에서 발굴 조사된 고선박의 선체부재 중 선미판재 2단에서 연속적으로 채취한 4개의 연륜을 대상으로 위글 매치 분석을 실시하였다. 분석한 결과는 전체 일치도 A=98.3%이며, 수용한계(5% 유의수준) $An=35.4%$ 이므로 χ^2 검정을 만족하였다(Figure 5).

95.4% 신뢰구간에서 40번째 연륜은 AD 1311-1330년 또는 1386-1403년의 두 연대 구간으로 분석되었다(Table 5, Figure 6). 최외각 연륜까지 26개의 연륜이 더 존재하므로 선미판재 2단의 연대구간은 95.4% 신뢰구간에서 AD 1337-1356년 또는 1412-1429년이다(Figure 7).

4. 고찰 및 결론

2015년 태안 마도해역에서 4번째로 발굴 조사된 마도4호선의 선체부재와 동반 출수된 유물의 방사성탄소연대 측정을 실시하였으며, 결과의 신뢰성과 교차검정을 위해 복수기관에 동일한 시료를 측정 의뢰하였다. 고선박에서 출수된 2점의 선체부재와 근처에서 출수된 닻가지 등 3점의 목재부재와 동반 출수된 1점의 곡물류에서 채취한 시료를 측정한 결과, 두 기관의 측정된 연대 구간이 서로 겹쳐지게 산출되어 측정된 결과의 신뢰성을 확인하였다(Figure 8).

선체부재인 선미판재 2단을 대상으로 위글 매치 분석을 실시하여 최외각 연륜인 66번째 연륜의 연대 구간이 95.4% 신뢰구간에서 AD 1331-1391년 또는 1410-1433년으로 산출되었다. 위글 매치 분석을 실시하였으나, 위글(wiggle)이라 불리는 단주기의 변동 폭이 큰 구간에 분석된 연대 구간이 포함되어 보다 많은 오차 범위를 줄일 수 없었다.

고선박에서 출수된 목재부재 2점의 연대분석 결과

14-15세기에 벌채된 목재를 이용하여 제작된 것으로, 단년생인 곡물류의 연대결과인 15세기 초중반에 난파된 것으로 판단된다. 또한, 마도4호선에서 25 m 떨어진 곳에서 2014년에 발굴 인양된 닻가지의 연대구간이 선미판재, 괴임목, 곡물류의 연대구간과 겹쳐지는 것으로 보아, 발굴 조사된 고선박과 연관성이 있다고 할 수 있다.

마도4호선은 목간판독을 통해 역사적 사실을 알 수 있었던 이전 마도1, 2, 3호선과는 다르게 분청사기의 명문을 통해 그 선박의 연대를 추정할 수 있었다. 출수된 분청사기 발과 접시는 150여 점으로 그중 3점에 ‘내섬(內贍)’이라는 글자가 새겨져 있다. 이는 조선시대 궁궐에 물품을 관리하던 내섬시(內贍寺)를 의미하는데 ‘내섬’을 분청사기에 새기기 시작한 때는 관청의 명칭을 표기하도록 하는 1417년(태종 17년 4월 20일 병자 3번째 기사)으로 알려졌다. 이와 함께 자기의 형태, 문양, 제작기법 등을 살펴보면 15세기 초반 제작 양식임을 알 수 있다. 따라서 마도4호선은 1417-1425년(태종~세종)에 물품을 신고 향해하다가 마도해역에서 침몰했을 것으로 추정된다. 그리고 마도4호선에서는 일부 화물의 종류와 수량이 적힌 목간이 확인되었다. 목간의 내용은 대부분 ‘나주광흥창(羅州廣興倉)’이며, 이를 통해 마도4호선이 전라남도 나주에서 출발하여 서울의 광흥창을 향하던 중 마도해역에서 좌초된 것으로 추정할 수 있다. 화물의 종류는 보리, 쌀 등으로 마도4호선이 국가에서 운영한 조운선임을 알 수 있다(National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2016).

자기의 형태, 목간의 형태와 내용 그리고 선체의 구조 등을 종합적으로 고려할 때 마도4호선은 조선시대의 선박으로 편년되었다. 이는 선체부재와 동반 출수된 곡물류 등의 방사성탄소연대와 일치하므로 마도4호선은 최초로 발굴된 조선시대 선박이라 할 수 있다. 마도4호선 이전에 발

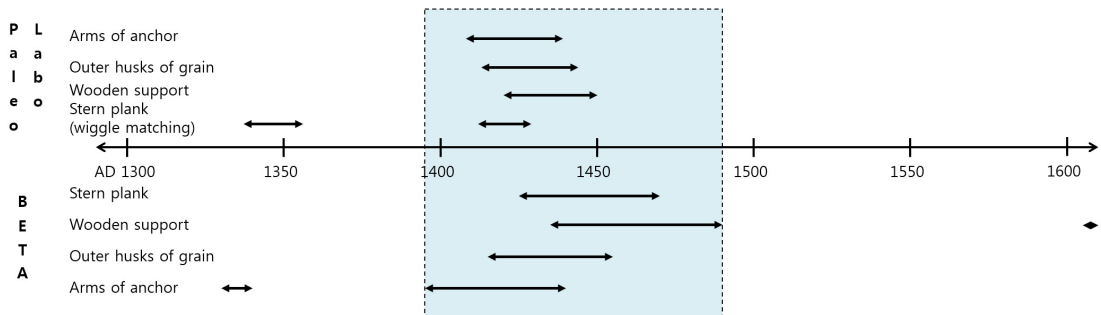


Figure 8. The result comparison of dating for Mado shipwreck No. 4.

굴 인양된 우리나라 고선박은 총 10척으로 통일신라시대와 고려시대 선박이었다. 마도4호선의 발굴로 조선시대 선박의 구조, 생활사, 해양사, 도자사 등의 연구에 중요한 자료로 이용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- 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)
- Nam, T.G., 2012, Species identification and dating for the woods excavated from Jongmyo square, Seoul, Korea. Master's thesis, Chungbuk National University, Cheongju. (in Korean with English abstract)
- Nam, T.G., 2013, Wiggle matched radiocarbon dates of woods excavated from Mado shipwreck No. 3 Taean, Korea. *Journal of Maritime Culture*, 6, 217-233. (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)
- National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2016, Taean Mado shipwreck No. 4 underwater excavation. (in Korean with English abstract)
- Ramsey, B.C., van der Plicht, J. and Weninger, B., 2001, Wiggle matching radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 43(2A), 381-389.
- Ramsey, B.C. and Lee, S., 2013, Recent and planned developments of the program OxCal. *Radiocarbon*, 55(2-3), 720-730.
- Song, J.A., Son, B.H. and Park, W.K., 2012, Wiggle matched radiocarbon dates of charcoal in a fired dwelling excavated at the Pungnaptoseong earthen wall, Baekje. *Journal of Conservation Science*, 28(4), 411-416. (in Korean with English abstract)