

연구 보고서

**충주 칠금동 392-5번지 일대 제철유적
발굴조사 출토 탄화목재의 과학적 분석**

2016. 12.

충북대학교 산학협력단부설 목재연륜소재은행

제 출 문

국립중앙문화재연구소장 귀하

본 보고서를 “**충주 칠금동 392-5번지 일대 제철유적 발굴조사 출토 탄화 목재의 과학적 분석**” 용역의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 12.

주관연구기관명 : 충북대학교 산학협력단부설 목재연륜소재은행

주관연구책임자 : 목재연륜소재은행장/ 목재·종이과학과 교수 한규성

선 임 연 구 원 : 서정욱(목재·종이과학과 교수)

연 구 원 : 손병화, 정현민(목재연륜소재은행)

요 약 문

국립중원문화재연구소가 발굴조사한 『충주 칠금동 392-5번지 일대 제철유적』에서 출토된 탄화목재에 대하여 수종분석, 발열량조사, 방사성탄소연대측정을 실시하였다.

수종 분석 결과, 4호 유구(Ⅱ층 제련유구, 8점), 3호 유구(V층 수혈유구, 2점), 7호 유구(V층 수혈유구, 3점)에서 출토된 탄화목재는 모두 상수리나무류(*Cerris* group)로 식별되었다. 5호 유구(V층 수혈유구, 1점) 출토 탄화목재는 굴피나무(*Platycarya strobilacea* S. et Z.)로 식별되었다.

발열량 조사는 각 유구별로 1점씩 선발하여 실시하였다. 발열량 분석결과 상수리나무류는 4,868~5,197 kcal/kg이며 굴피나무는 4,200 kcal/kg으로 참나무류 숲의 일반적 발열량인 7,860 kcal/kg와 8,020 kcal/kg에 미치지 못하였다. 발열량 분석을 실시한 탄화목재를 현미경으로 관찰 한 결과 탄화목재의 형태가 그대로 유지되어 있는 것으로 확인되었다. 이러한 이유는 탄화목재가 오랜 기간 토양 중에 묻혀있으면서 목재세포의 화학적 특성이 변한 것으로 판단되었다. 정상적인 발열량 분석은 불가능하였으나, 해당 시대에 제련을 목적으로 사용된 상수리나무류는 타 수종에 비해 발열량이 우수한 연료제임을 확인할 수 있었다.

4호 제련유구의 위글매치 측정결과, 95.4% 신뢰구간에서 AD 237~268년(41.8%), AD 283~333년(53.6%)으로 산출되었다. 3호와 7호 수혈 유구에서 출토된 탄화목재는 95.4% 신뢰구간에서 각각 AD 132~238년, AD 130~235년으로 산출되어 동시대의 유구로 확인되어 4호 제련유구보다는 약 100년 정도 앞서는 것으로 분석되었다. 본 결과는 발굴 조사 결과와 일치하는 것으로 V층에 해당하는 층위(3호 유구, 7호 유구)가 먼저 형성이 되고, 이후에 Ⅱ층(4호 제철유구)이 형성되면서 가마를 만들어 사용과 폐기를 반복하면서 장기간 동일한 위치에서 철 생산이 이루어졌음을 과학적으로 증명할 수 있었다.

충주 칠금동 392-5번지 일대 제철유적 발굴조사 출토 탄화목재의 과학적 분석

1. 조사대상

국립중앙문화재연구소가 2016년 4월부터 ~ 6월까지 실시한 『충주 칠금동 392-5번지 일대 발굴조사』에서 제련로, 정련로, 소성유구, 철광석 파쇄장 등의 유구를 찾았으며, 송풍관, 철광석, 슬래그, 토기편 등의 출토 유물들을 근거로 고대 백제의 제철유적지로 확인하였다.

본 연구는 제련로 및 수혈유구에서 출토된 탄화목재를 대상으로 수종분석, 발열량 조사, 방사성탄소연대측정(AMS) 등을 실시하여 고대 제철유적에서 사용된 목재에 대한 과학적인 기초자료를 마련하고자 실시되었다.

표 1. 조사대상

no.	층위	유구명	성격	점수	분석종류
1	Ⅱ 층	4호 유구	제련로	8	수종, AMS(위글매치)
2	V 층	3호 유구	수혈	2	수종, AMS(단독)
3	V 층	5호 유구	수혈	1	수종
4	V 층	7호 유구	수혈	3	수종, AMS(단독)



4호(II층) 제련유구 출토 탄화목재



3호(V층) 수혈유구 출토 탄화목재



5호(V층) 수혈유구 출토 탄화목재



7호(V층) 수혈유구 출토 탄화목재

그림 1. 조사 지역 및 탄화목재 채취

2. 탄화목재의 수종조사

모든 목재는 다양한 세포들(예: 도관, 가도관, 목섬유, 유세포, 등)로 이루어져 있으며, 수종에 따라서 세포의 모양, 크기, 배열 등이 다르다. 따라서 현미경(예, 실체현미경, 광학현미경, 주사전자현미경(SEM))을 이용하여 목재세포의 모양, 크기, 배열 등을 확인하면 목재의 수종을 식별할 수 있다.

제련 당시 연료용으로 사용된 목재의 수종을 밝히고, 주위식생 분포를 파악하고자 제련유구에서 8점, 수혈유구에서 6점의 탄화목재 수습하여 수종분석을 실시하였다.

2.1 분석방법

먼저 육안관찰 방법으로 탄화목에 붙어 있는 흙을 간단히 제거하였다. 다음으로 메스를 이용하여 탄화목 외부에 붙어 있는 다른 불순물을 제거하였으며, 마지막으로 붓을 사용하여 미세한 불순물까지 조심스럽게 제거하였다. 정리된 시료는 실체현미경(Nikon, SMZ18)과 주사전자현미경(FE-SEM, ZEISS, LEO-1530)을 이용하여 미세구조를 관찰하여 수종을 식별하였다. 자세한 수종분석 방법은 아래와 같다.

- ① 탄화목재로부터 흙과 이물질 제거.
- ② 실체현미경을 이용한 1차 수종식별
 - 침엽수 또는 활엽수로 분류(활엽수의 경우, 환공재 또는 산공재로 분류).
- ③ 주사전자현미경을 이용한 2차 수종식별
 - 삼단면(횡단면, 방사단면, 접선단면) 제작.
 - 100°C 건조기에서 48시간 이상 건조시켜 수분을 완전히 제거
 - 금(Gold)으로 코팅 후 주사전자현미경으로 촬영(충북대학교 공동실험실습관).

수종식별은 ‘목재조직과 식별’(박상진 외, 1987), ‘한국산 목재의 구조’(이필우, 1994), ‘국산 활엽수재의 목재조직’(박상진, 1990), 한국산 유용수종의 목재성질’(정성호 등, 2008)을 참조하여 실시하였으며, 최종 결정은 충북대학교 목재연료소재은행 소장 목재재감 프레파라트와 상호비교 함으로써 이뤄졌다.



그림 2. 주사전자현미경(LEO-1530, 충북대학교 공동실험실습관)

2.2 조사결과

충주 칠금동 392-5번지 일대 제철유적 발굴조사에서 출토된 탄화목 14점을 대상으로 수종 조사를 실시한 결과, 4호 유구(Ⅱ층, 8점), 3호 유구(V층, 2점), 7호 유구(V층, 3점)에서 출토된 탄화목재는 모두 상수리나무류(*Cerris* group)로 식별되었다. 5호 유구(V층, 1점) 출토된 탄화목재는 굴피나무(*Platycarya strobilacea* S. et Z.)로 식별되었다.

표 2. 탄화목재의 수종조사 결과

no.	층위	유구명	성격	점수	수종
1	Ⅱ층	4호 유구	제련로	8	상수리나무류(<i>Cerris</i> group)
2	V층	3호 유구	수혈	2	상수리나무류(<i>Cerris</i> group)
3	V층	5호 유구	수혈	1	굴피나무(<i>Platycarya strobilacea</i> S. et Z.)
4	V층	7호 유구	수혈	3	상수리나무류(<i>Cerris</i> group)

2.3 수종별 특징

2.3.1 굴피나무(*Platycarya strobilacea* S. et Z.)

- 가래나무과(Juglandaceae) 굴피나무속(*Platycarya*)

공관이 1~3열로 배열하는 환공재로 대도관의 접선방향직경은 100~200 μm 이고 소도관의 접선방향직경은 30~50 μm 이었다. 소도관은 원형~타원형, 다각형의 박벽으로 집합하여 접선상으로 배열하고 있었으며, 축방향유세포는 주위상 및 대상배열로 관찰되었다. 도관의 천공은 단천공이며, 소도관에서 나선비후가 관찰되었다. 도관상호간 벽공은 교호상 벽공이고, 도관과 방사조직간 벽공은 원형과 타원형이 혼재하였다. 방사조직은 평복, 직립, 방형세포가 혼재되어 있는 이성형이었으며, 결정이 다수 존재하였다. 접선단면에서 관찰한 방사조직은 1~5열이었다. 이상의 결과로 조사 탄화목재의 수종은 굴피나무로 식별되었으며, 우리나라에서는 굴피나무속 중에서 굴피나무 1종만이 분포하고 있다.

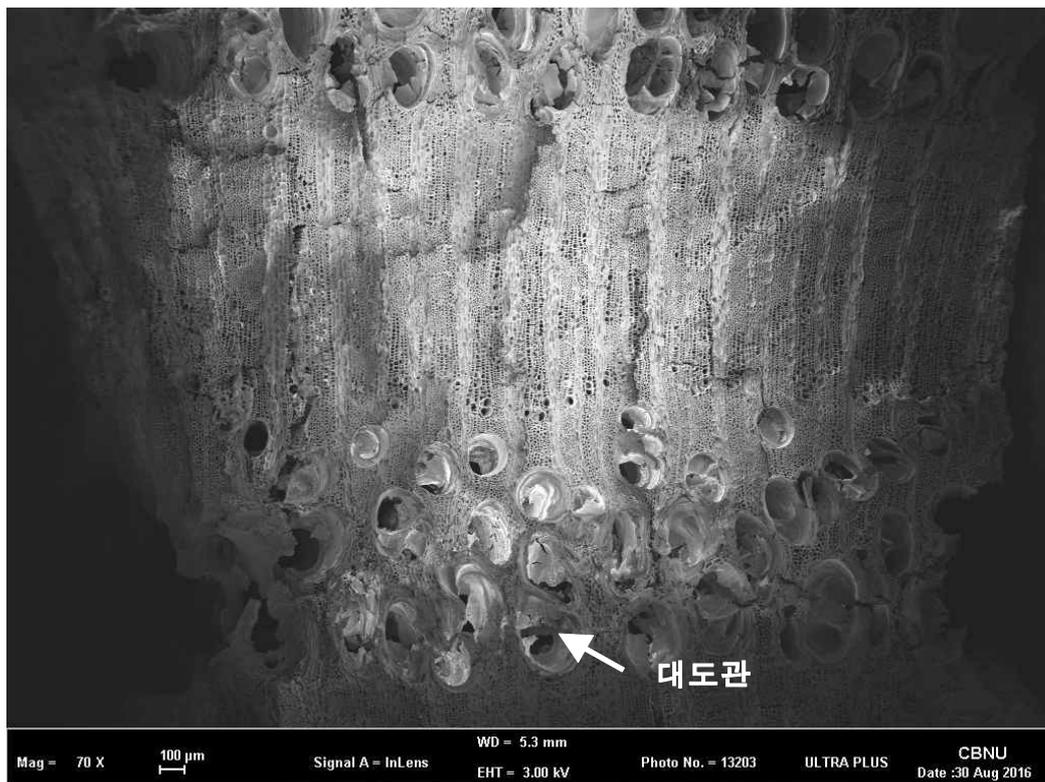


그림 3. 굴피나무의 횡단면 I

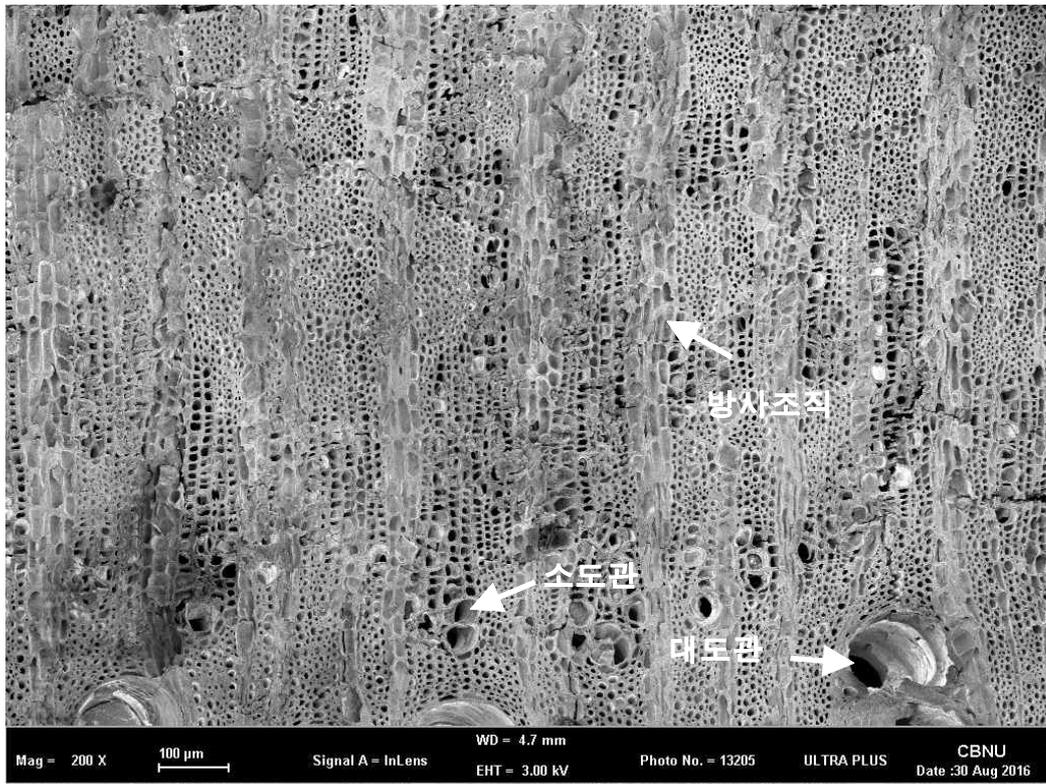


그림 4. 굴피나무의 횡단면 II

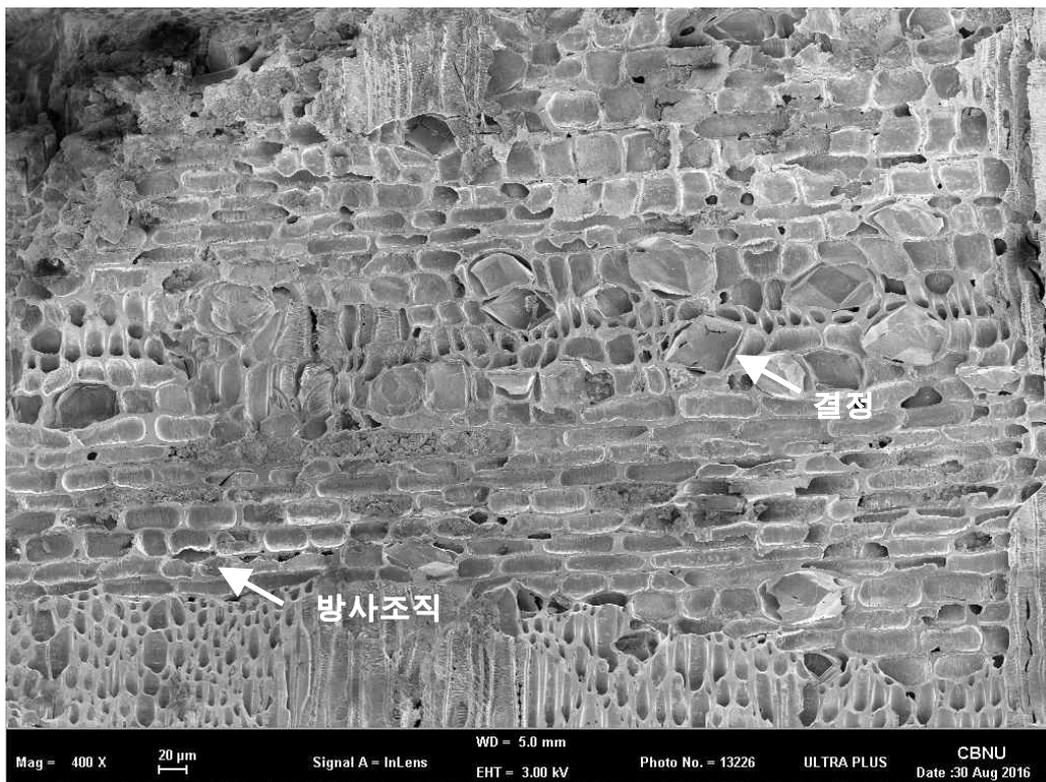


그림 5. 굴피나무의 방사단면 I

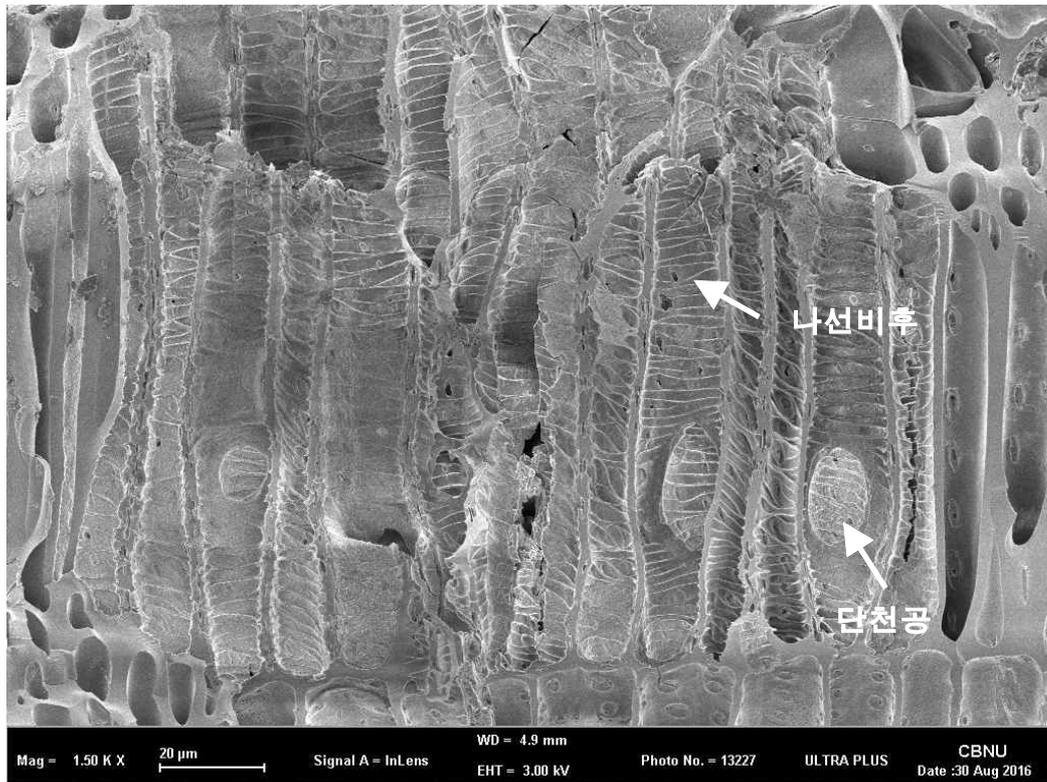


그림 6. 굴피나무의 방사단면 II

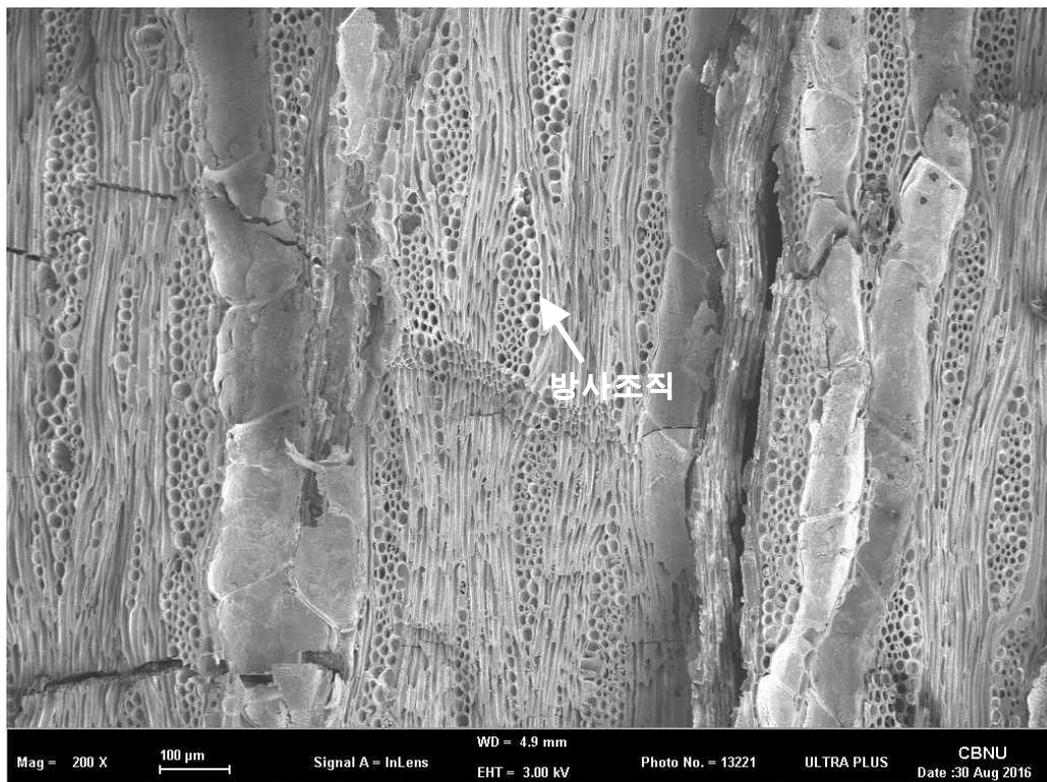


그림 7. 굴피나무의 접선단면 I

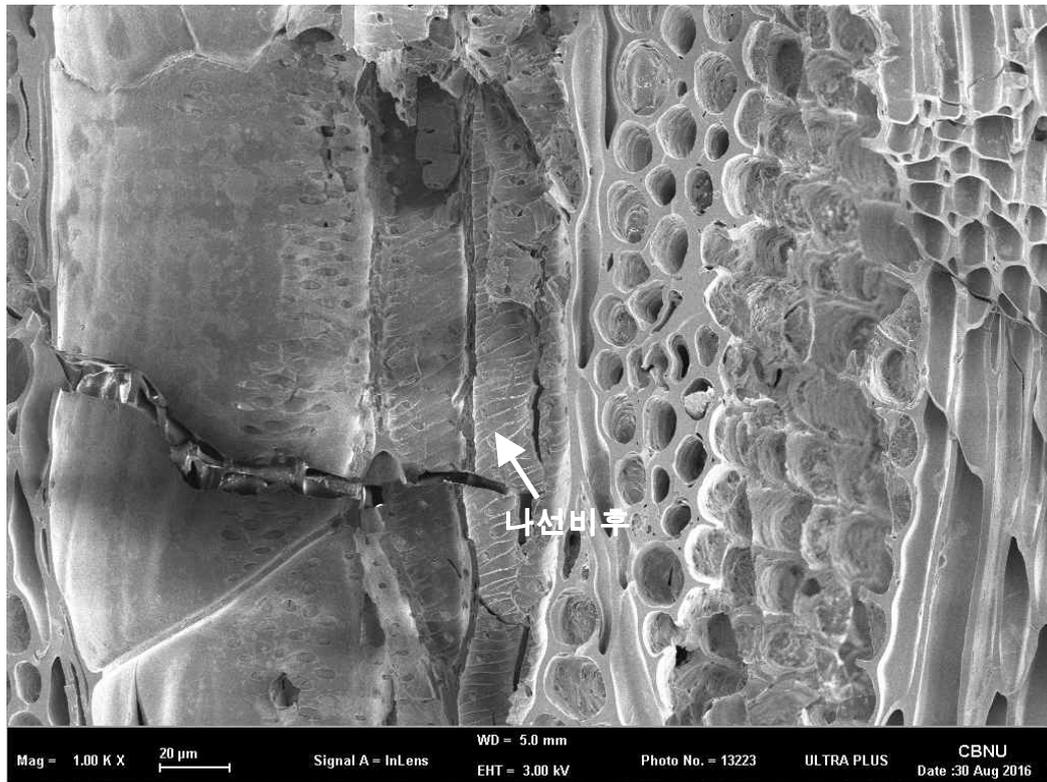


그림 8. 굴피나무의 접선단면 II

2.3.2 상수리나무류(*Cerris group*)

- 참나무과(Fagaceae) 참나무속(*Quercus*) 상수리나무아속(*Lepidobalanus*)

환공재로써 연륜경계를 따라 대관공이 다열로 관찰되었으며, 광방사조직이 존재하였다. 공권이외의 소관공은 후벽이었으며, 방사방향으로 배열되었다. 방사조직은 평복세포로만 이루어진 동성형 방사조직이 관찰되었다. 접선단면에서 단열 또는 30열 이상의 방사세포로 구성된 광방사조직이 관찰되었다. 도관과 도관이 수직으로 접하는 곳에서는 단천공이 확인되었다. 이상의 결과를 근거로 상수리나무아속으로 수종을 식별하였다. 상수리나무아속은 도관의 횡단면상 배열 상태에 따라 상수리나무류(상수리나무, 굴참나무)와 졸참나무류(신갈나무, 졸참나무, 갈참나무, 떡갈나무 등)로 구분된다. 분석 시료는 공권이외의 소도관 모양이 원형이고 후벽이었으며, 방사상으로 독립적인 배열을 하고 있어 상수리나무류로 식별하였다. 졸참나무류는 소도관 모양이 각형이고 박벽인 것이 특징이다.

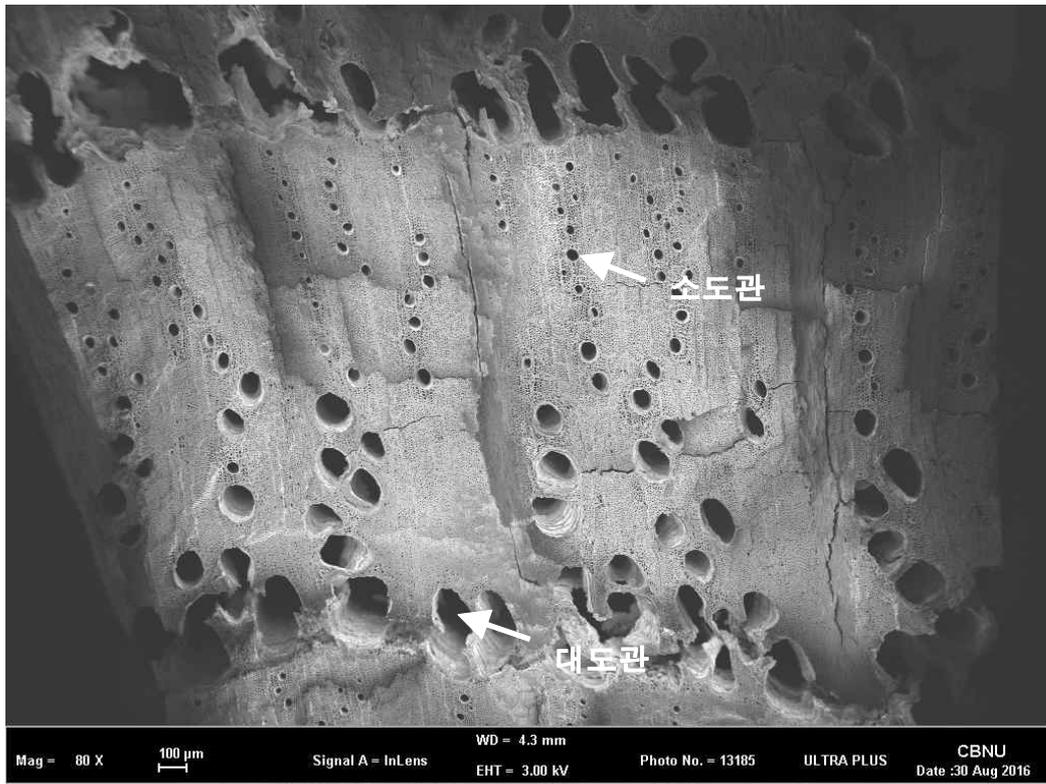


그림 9. 상수리나무류의 횡단면 I

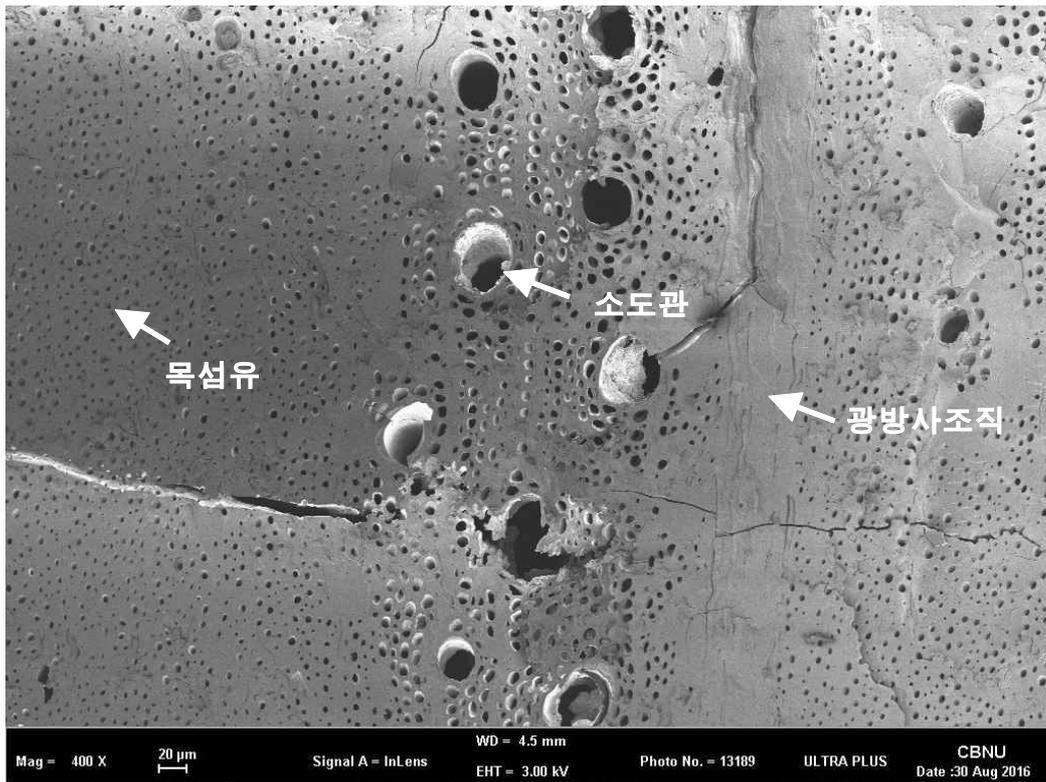


그림 10. 상수리나무류의 횡단면 II

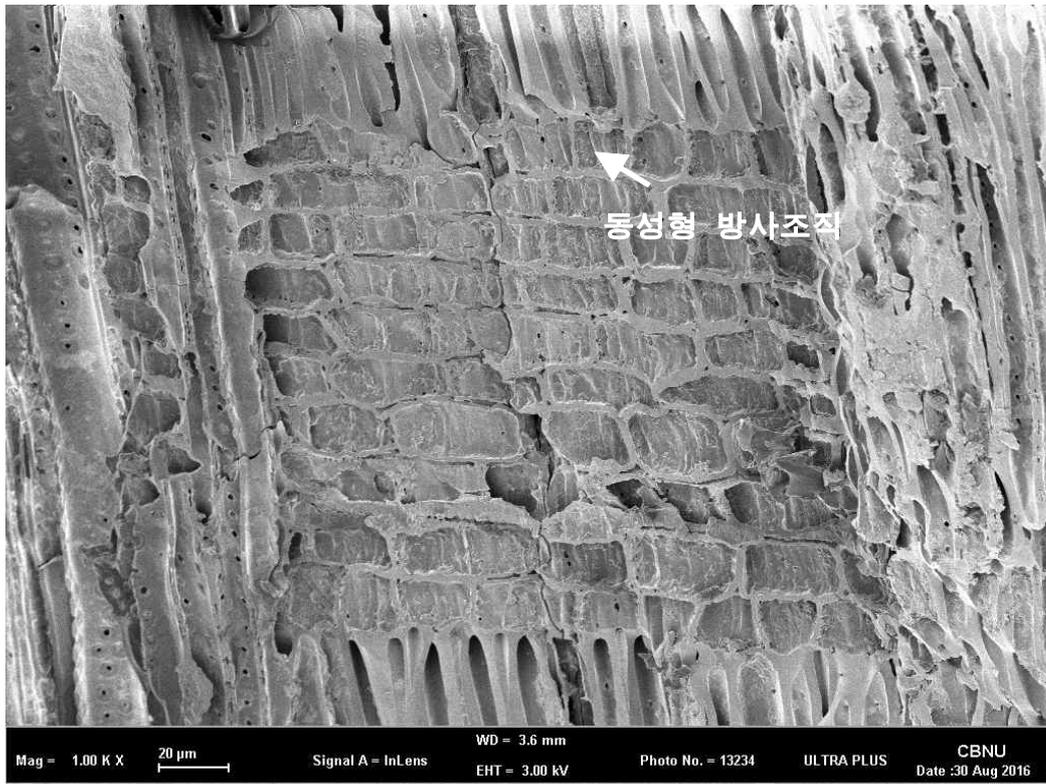


그림 11. 상수리나무류의 방사단면



그림 12. 상수리나무류의 접선단면 I

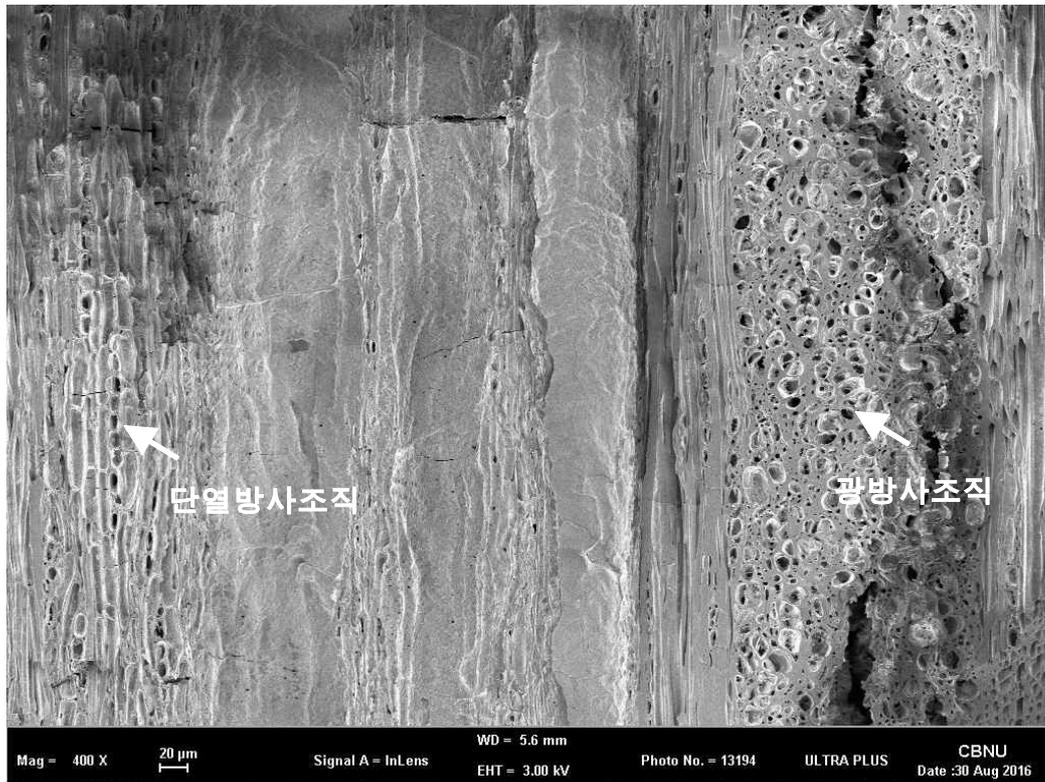


그림 13. 상수리나무류의 접선단면 II

3. 발열량 조사

목재를 대기 중에서 가열하면 우선 목재 내 수분이 제거되고, 그 후 연소(燃燒)에 의해 목재 내 탄소, 산소 및 수소가 공기 중의 산소와 결합하여 이산화탄소와 물로 변화되어 휘산(揮散)되어 미량의 회분만이 남게 된다. 그러나 가스배출구를 갖춘 용기에서 공기의 공급을 차단한 후에 목재를 가열하면 연소를 일으키지 않고 훈소(燻燒)하면서 각 구성원소는 서로 결합하여 각종 화합물을 생성하고, 다시 결합과 복분해를 하면서 복잡한 화합물로 변화되어 휘산됨으로써 결국 목탄만이 남게 된다.¹⁾

3.1 재료 및 방법

발열량 조사는 각 유구에서 대표 탄화목 1점씩을 선발하여 실시하였으며, 정확한 발열량 조사를 위하여 탄화목재에 붙어있는 철 부산물, 흙, 기타 이물질을 최대한 제거하였다. 이물질 제거를 위해 먼저 육안관찰 방법으로 탄화목에 붙어 있는 흙을 간단히 제거하였

1) 신동소 외, 1994, “임산화학”, 향문사, p.345

다. 다음으로 메스를 이용하여 탄화목 외부에 붙어 있는 다른 불순물을 제거하였으며, 마지막으로 초음파세척기를 사용하여 미세한 불순물까지 최대한 제거하였다. 불순물 제거 후 탄화목은 105°C 건조기에서 24시간 건조되었다.

발열량 실험은 열량계(Parr Instrument Co.의 6400 Calorimeter)를 이용하여 실시하였다. 측정 방법은 건조된 탄화목 시료를 열량계에 넣고, 산소를 충전한 후 점화하여 1g 당 cal값을 측정하는 것이다.

3.2 발열량 조사 결과

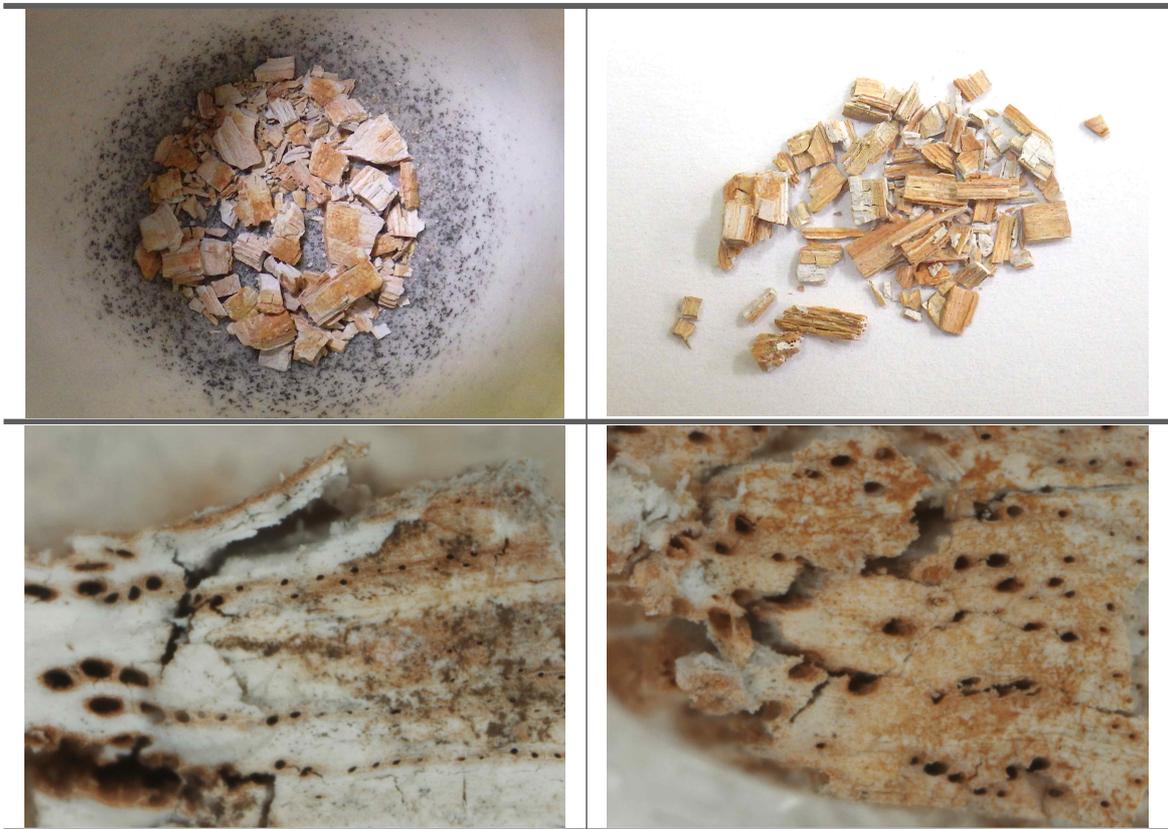


그림 14. 회화 실험 후 잔존 회분의 단면

분석결과 상수리나무류는 4,868~5,197 kcal/kg이며 굴피나무는 4,200 kcal/kg으로 참나무류 숲의 일반적 발열량인 7,860 kcal/kg와 8,020 kcal/kg에 미치지 못하였다. 그 원인을 분석하기 위해 현미경 관찰을 한 결과, 탄화목재 형태가 그대로 남아 있는 회

분을 확인할 수 있었다(그림 14). 일반적으로 발열량 실험 후에는 목재의 형태를 확인할 수 없는 미량의 회분만이 남는다. 본 결과를 근거로 발열량 실험에 사용된 탄화목재는 오랜 기간 토양 중에 묻혀있으면서 목재세포의 화학적 특성이 변하여 일반 숲의 발열량을 내지 못한 것으로 판단되었다.

본 실험에서 정상적인 발열량 분석은 불가능하였으나, 해당 시대에 제련을 목적으로 사용된 상수리나무류는 타 수종에 비해 발열량이 우수한 연료재임을 표 3에서 확인할 수 있었다. 상수리나무류에 속하는 상수리나무와 굴참나무의 단위중량당 발열량은 각각 7,930 kcal/kg, 7,860 kcal/kg이고, 목탄톤당 원목소요량은 각각 4.8 m³/t, 4.4 m³/t이다. 발열량은 연료의 성능을 나타내는 가장 중요한 기준이며, 이상의 결과는 타 수종보다 높은 값으로 상수리나무류가 우수한 연료 재료임을 확인할 수 있다.

표 3. 현생 참나무류의 탄화 특성 비교²⁾

수종	탄화율 (%)	목탄 용적중 (g/cm ³)	수축률(%)		발열량		공업분석(%)				목탄 톤당 원목 소요량 (m ³ /t)
			길이	폭	중량 (kcal/kg)	부피 (10 ³ kcal/m ³)	고정탄소	수분	회분	휘발분	
상수리나무	32.7	0.501	17.2	24.8	7,930	3,973	86.7	1.8	2.3	9.2	4.8
굴참나무	33.6	0.483	16.9	23.7	7,860	3,796	84.6	2.6	2.5	10.3	4.4
졸참나무	33	0.538	15.4	23.7	7,860	4,229	82.9	3.1	1.3	12.7	4.7
신갈나무	33.5	0.475	16.0	24.2	8,020	3,810	86.8	2.3	1.0	9.9	4.6

4. 방사성탄소연대

방사성탄소연대측정법은 1950년대 Libby에 의해 알려진 후 세계적으로 널리 이용되고 있는 절대연대측정법으로 고고학, 지질학, 해양학 등 여러 분야에서 널리 응용되고 있다. 측정 원리는 유기물 속에 남아있는 방사성탄소의 농도를 측정하고 ¹⁴C의 반감기를 이용하여 연대를 계산하는 것이다. 하지만, 대기 중 방사성탄소농도 변동, 지구 자기장

2) 정성호, 박병수, 2008, 『한국산 유용수종의 목재성질』, (국립산림과학원), p.296-299

변동, 해양의 영향 등으로 오차를 갖게 된다. 이러한 오차는 연대가 정확히 밝혀진 표준 물질로 보정이 가능한데, 대표적인 것이 나이테로 작성된 연대기이다. 그러나 이 보정에도 한계가 있어 태양활동과 지구 자기장변동으로 생기는 위글(wiggle)이라 불리는 단주기의 변동은 극복하기 어렵다. 이러한 단점을 해결하고자 유물에서 일정한 간격으로 나이테의 방사성탄소연대를 연속 측정하여 그 결과를 보정곡선의 위글(wiggle)에 맞춤으로써 오차를 줄이는 wiggle matching법이 최근 활용되고 있다.

본 연구에서는 위글매칭(wiggle matching)법을 활용하여 제철유적에서 가장 중요한 제련유구인 4호 유구(Ⅱ층)에서 수습한 탄화목재의 연대를 측정하여 유구의 정확한 형성연대를 도출하고자 하였다. 측정을 위해 해당 유구에서 획득한 여러 탄화목재 중 나이테가 가장 많은 것을 선발하였으며, 선발된 탄화목재의 가장 안쪽 나이테와 최외각 나이테를 활용하여 시료를 준비하였다(그림 15). 3호 유구(V층)와 7호 유구(V층)에서 출토된 탄화목재는 정확한 나이테 순서를 확인할 수가 없어 한 시료의 절대값으로 연대를 측정하는 AMS(단독)법이 적용되었다. 획득된 결과는 각 층위별 선후관계를 파악하는데 활용되었다.

4.1 재료 및 방법

4호 유구에서 출토된 탄화목재(잔존 연륜 수 10개)는 위글매칭 방법으로 연대측정을 하기 위해 1~2번째와 9~10번째 나이테를 이용하여 시료를 준비하였으며, 3호 유구와 7호 유구에서는 충분한 나이테 확보와 나이테 순서 확인이 어려워 한 부위에서만 시편을 채취하여 동위원소 측정을 위한 시료 준비를 실시하였다.

표 4. 방사성탄소연대 측정 시료

분석ID	유구명(층위)	시료번호	측정 나이테	방법
CJ ③	4호 유구(Ⅱ층)	TRS14-F01	1-2번째	위글매치
		TRS14-F02	9-10번째	
CJ ⑩	3호 유구(V층)	TRS14-F01	-	단독 측정
CJ ⑭	7호 유구(V층)	TRS14-F02	8번째	단독 측정

방사성탄소연대 측정은 일본 Paleo Labo社에 의뢰하여 실시하였다. 전처리는 초음파 세정 후 산·알카리·산세정(염산:1.2N, 수산화나트륨:0.1N, 염산:1.2N)으로 처리하였다.

조제된 시료는 가속기질량분석계(AMS 측정기기: 1.5 SDH-1 Pelletron Accelerator, 미국, NEC사)를 사용하여 탄소연대측정을 실시하였다.



그림 15. 방사성탄소연대 측정을 위한 시료 채취 부위

표 5. 방사성탄소연대 측정 시료 전처리

측정번호	시료번호	시료데이터	전처리
PLD-32497	CJ ③ (4호) TRS16-F05	종류 : 탄화목재 부위 : 1-2y (나무 중심쪽) 상태 : dry	초음파세정 산·알카리·산세정(염산 : 1.2N, 수산화나트륨 : 1.0N, 염산 : 1.2N)
PLD-32498	CJ ③ (4호) TRS16-F06	종류 : 탄화목재 부위 : 9-10y (수피쪽) 성상 : 최종형성연륜 상태 : dry	초음파세정 산·알카리·산세정(염산 : 1.2N, 수산화나트륨 : 1.0N, 염산 : 1.2N)
PLD-32495	CJ ⑩ (3호) TRS16-F03	종류 : 탄화목재 상태 : dry	초음파세정 산·알카리·산세정(염산 : 1.2N, 수산화나트륨 : 1.0N, 염산 : 1.2N)
PLD-32496	CJ ⑭ (7호) TRS16-F04	종류 : 탄화목재 상태 : dry	초음파세정 산·알카리·산세정(염산 : 1.2N, 수산화나트륨 : 1.0N, 염산 : 1.2N)

4.2 측정 결과

4.2.1 위글매치 측정결과³⁾

3) 14C 연대(yrBP)의 산출에는 리비(Libby)의 14C 반감기를 사용하였으며, 14C 연대의 역연교정에는 Oxcal4.1 (교정곡선데이터: INTCAL13)을 사용하였다. 역연교정이란 대기중의 14C 농도가 일정하다는 전제하에 반감기 5568 년으로 산출해왔던 14C 연대에 대하여 과거의 우주선강도(宇宙線強度)와 지구자장(地球磁場)의 변동에 의한 대기 중의 14C 농도 변동 및 반감기 차이(14C의 반감기 5730±40년)를 교정함으로써 실제 연대에 가까운 연대를 산출 하는 것이다.

4호 제련 유구에서 출토된 탄화목(CJ ③, 상수리나무류, 잔존 나이테의 수: 10개) 시료로부터 2개의 시료(1~2번째, 9~10번째 연륜)를 채취하여 wiggle match를 이용한 방사성탄소연대 측정을 실시하였다.

2개 연륜 시료의 wiggle matching에 대한 통계분석 결과(n=2), 전체 일치도 A=117.9%이며, 수용한계(5% 유의수준) An= 50.0%로 χ^2 검정을 만족하였다. 그 결과, 탄화목재의 연도는 95.4% 신뢰구간에서 AD 237~268년(41.8%), AD 283~333년(53.6%)으로 산출되었다.

표 6. 4호 유구 출토 탄화목에서 채취된 2개의 연륜시료에 대한 ^{14}C 측정연대 및 위글매치 결과

측정번호 시료번호	측정 나이테	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	^{14}C 연대 (yrBP $\pm 1\sigma$)	Cal. year로 교정한 연대범위 (A.D.)	
				1 σ 연대범위(68.2%)	2 σ 연대범위(95.4%)
PLD-32497 TRS16-F05	1~2 번째	-26.70 \pm 0.19	1779 \pm 18	230-258 AD (37.1%) 285-288 AD (2.1%) 296-322 AD (29.1%)	144-155 AD (1.1%) 168-195 AD (3.8%) 210-265 AD (46.2%) 271-333 AD (44.2%)
PLD-32498 TRS16-F06	9~10 번째	-26.80 \pm 0.20	1756 \pm 19	247-260 AD (15.3%) 280-325 AD (52.9%)	235-340 AD (95.4%)
위글매치 후 최외각(9-10번째) 연륜에 대한 방사성탄소연대				243-263 AD (34.2%) 303-327 AD (34.0%)	237-268 AD (41.8%) 283-333 AD (53.6%)

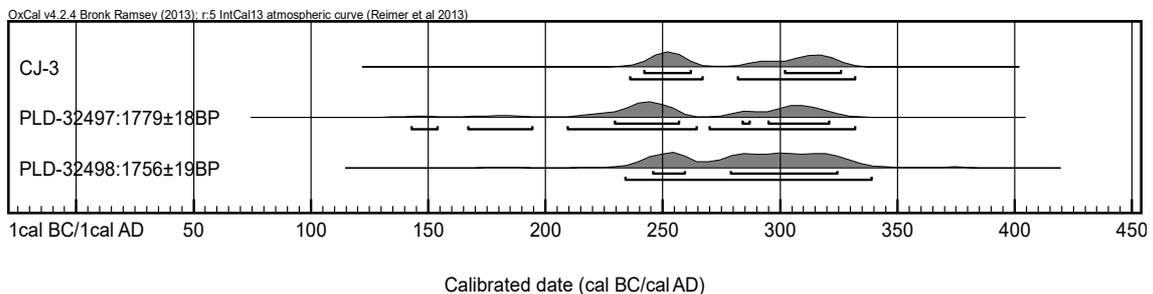


그림 16. 4호 유구 출토 탄화목에서 채취된 2개 연륜시료의 ^{14}C 연대 확률분포 (위글매치 前)

1 σ (One Sigma)의 역연대범위는 OxCal의 확률법을 사용하여 산출한 ^{14}C 연대 오차에 상당하는 68.2% 신뢰한계의 역연대범위이며, 2 σ (Two Sigma)의 역연대범위는 95.4% 신뢰한계의 역연대범위이다.

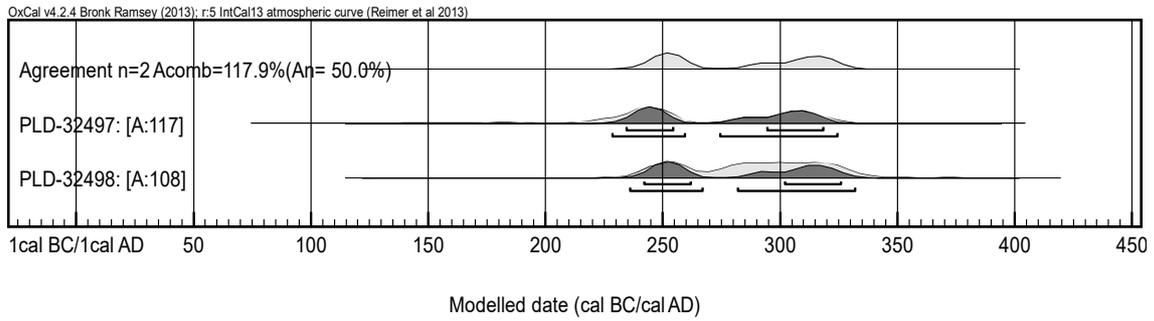


그림 17. 4호 유구 출토 탄화목에서 채취된 2개의 연륜시료를 이용한 ^{14}C 연대 확률분포 (회색: 위글매치 前, 흑색: 위글매치 後)

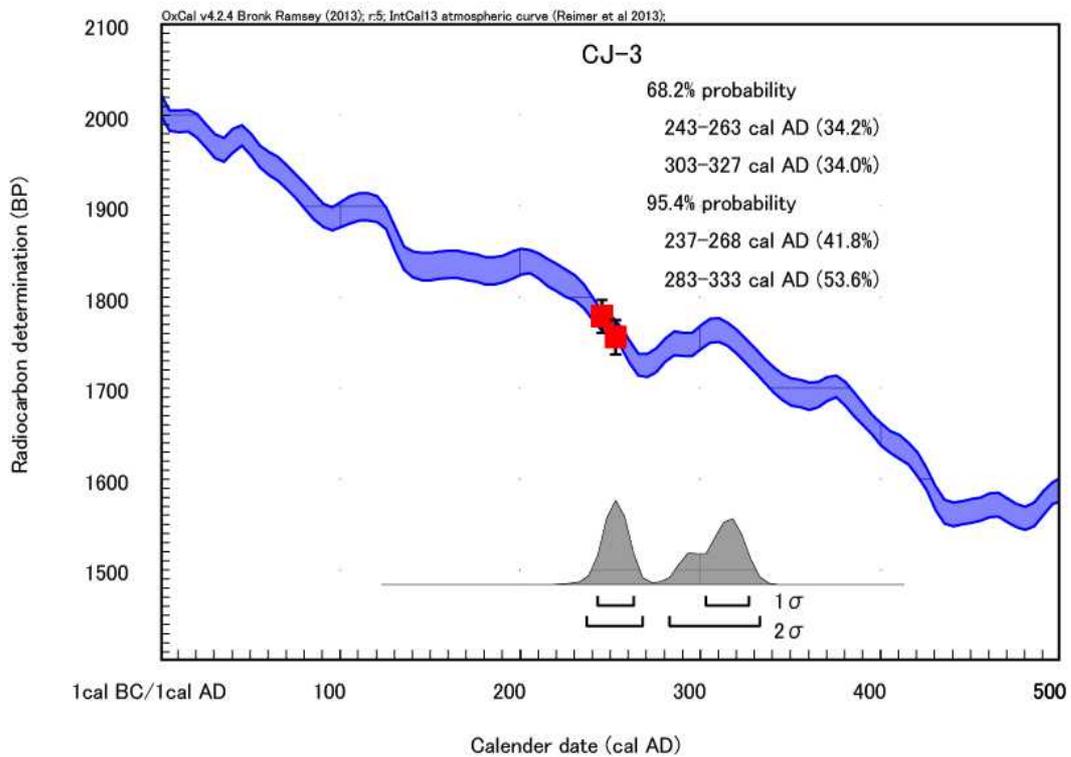


그림 18. 4호 유구 출토 탄화목에서 채취된 2개의 연륜시료에 대한 wiggle match 그래프

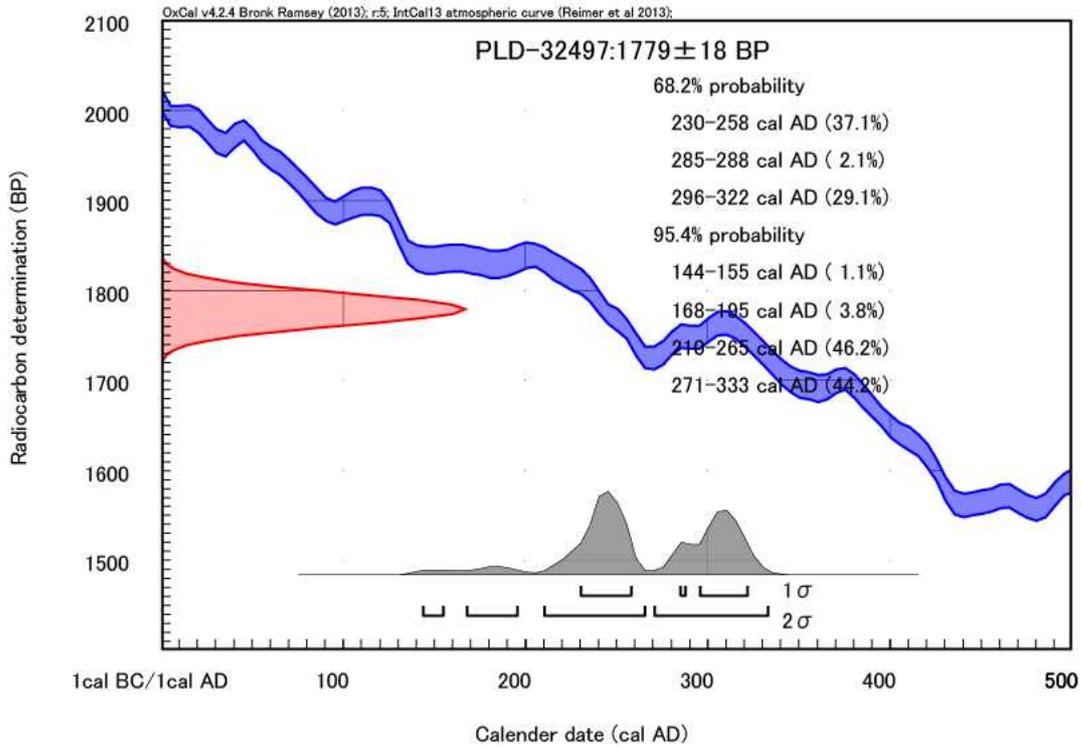


그림 19. 4호 유구 출토 탄화목에서 채취된 1~2번째 연륜 시료에 대한 개별 방사성탄소연대측정 결과

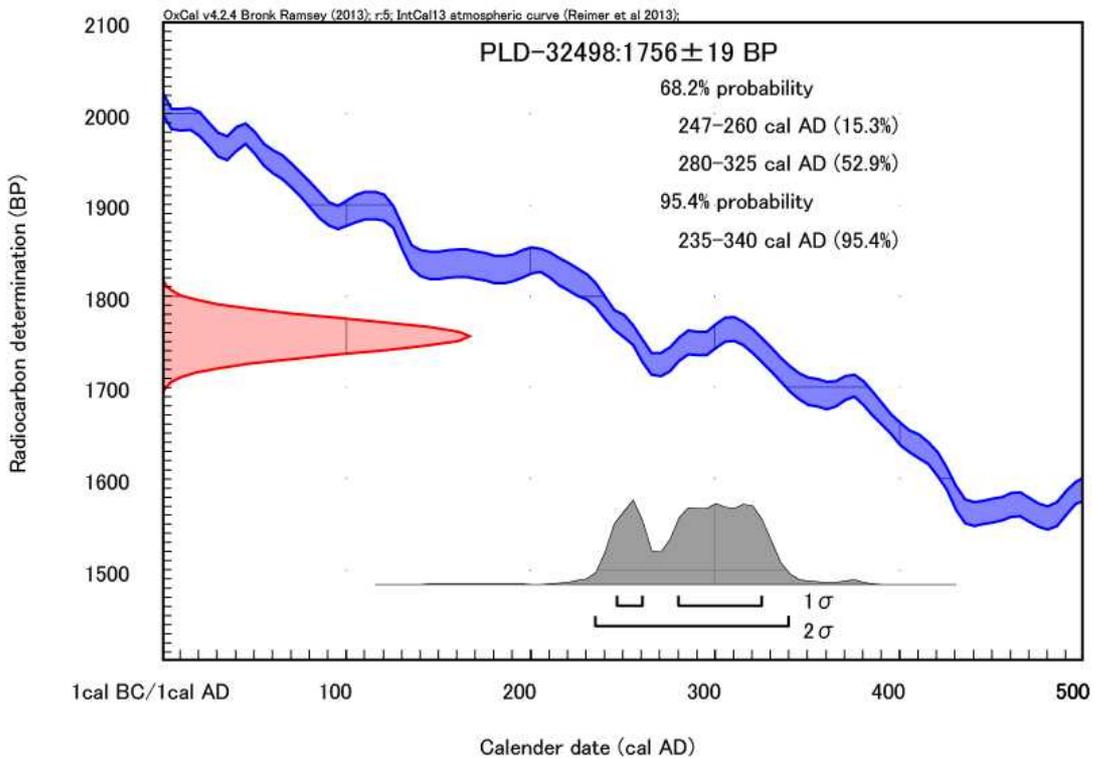


그림 20. 4호 유구 출토 탄화목에서 채취된 9~10번째 연륜 시료에 대한 개별 방사성탄소연대측정 결과

4.2.2 단독 측정결과

3호 유구(CJ ⑩, 상수리나무류)와 7호 유구(CJ ⑭, 상수리나무류)에서 출토된 탄화목재에 대한 방사성탄소연대 측정 결과, 95.4% 신뢰구간에서 각각 AD 132~238년, AD 130~235년으로 산출되었다. 따라서 3호 유구와 7호 유구는 동시대에 형성된 것으로 확인되었다.

표 7. 3호 유구에서 출토된 탄화목의 ^{14}C 연대측정 결과

측정번호 시료번호	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	^{14}C 연대 (yrBP $\pm 1\sigma$)	Cal. year로 교정한 연대범위 (A.D.)	
			1 σ 연대범위(68.2%)	2 σ 연대범위(95.4%)
PLD-32495 TRS16-F03	-26.57 \pm 0.23	1826 \pm 19	140-197AD (52.0%) 207-224 AD (16.2%)	132-238 AD (95.4%)

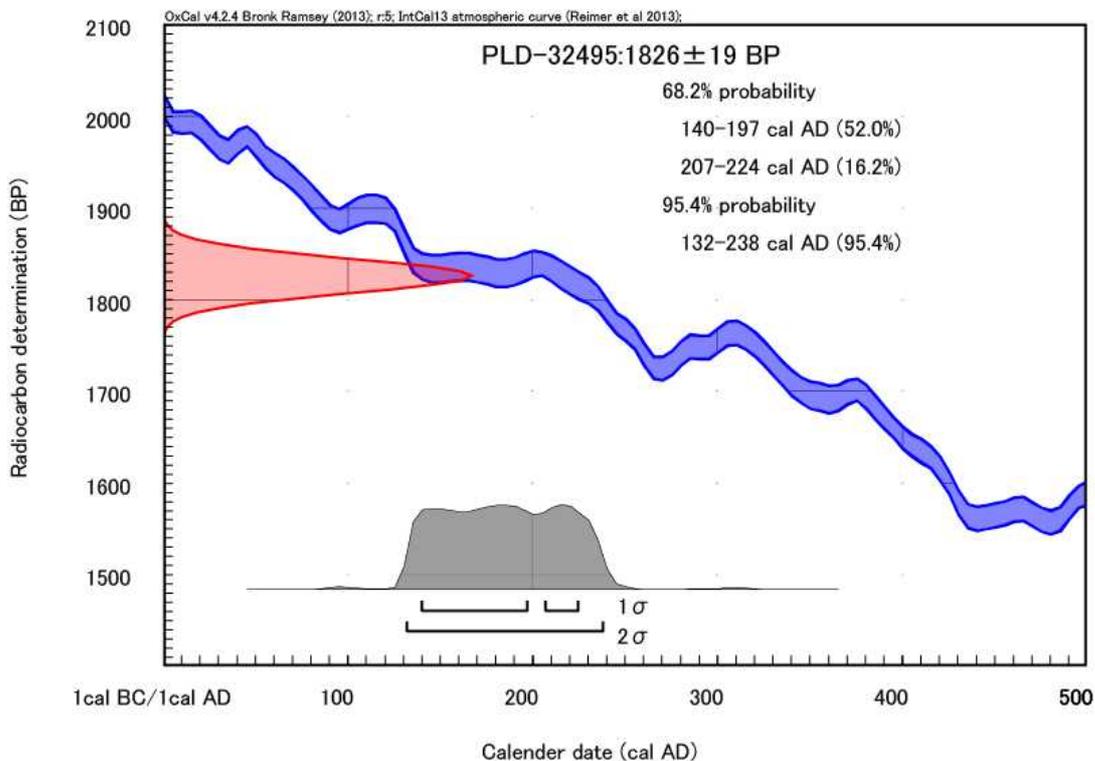


그림 21. 3호 유구 출토 탄화목재의 방사성탄소연대 측정결과

표 8. 7호 유구에서 출토된 탄화목의 ^{14}C 연대측정 결과

측정번호 시료번호	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	^{14}C 연대 (yrBP $\pm 1\sigma$)	Cal. year로 교정한 연대범위 (A.D.)	
			1 σ 연대범위(68.2%)	2 σ 연대범위(95.4%)
PLD-32496 TRS16-F04	-24.96 \pm 0.19	1832 \pm 18	138-215 AD (68.2%)	130-235 AD (95.4%)

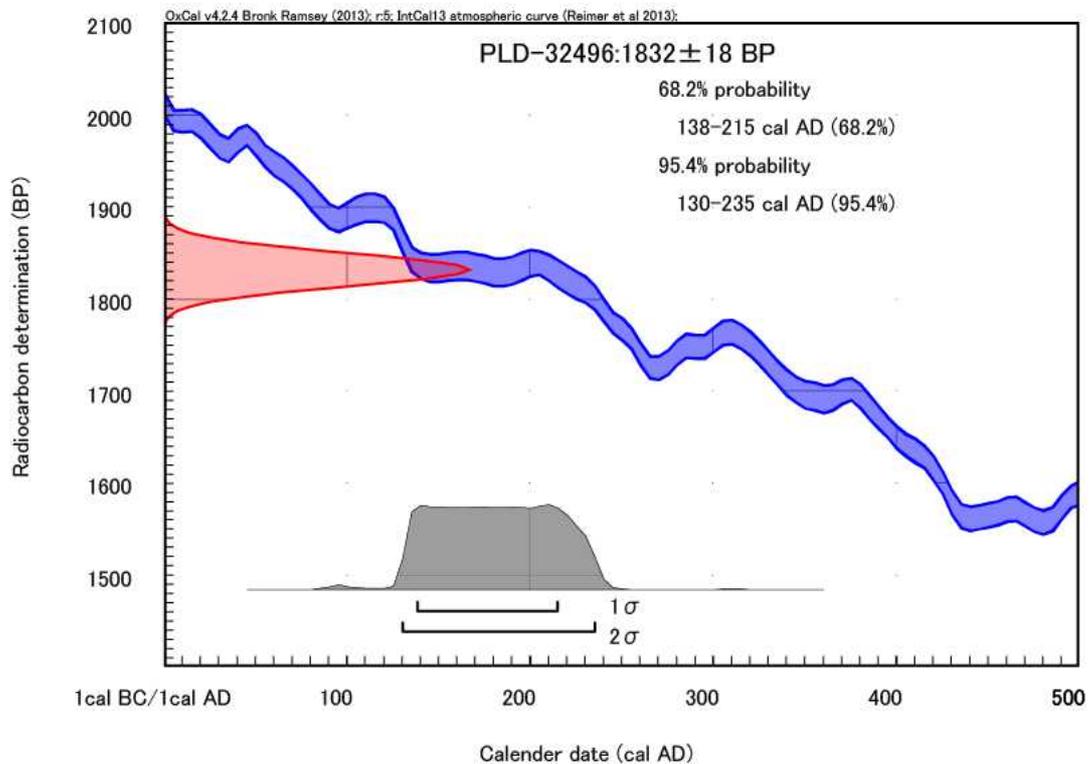


그림 22. 7호 유구 출토 탄화목재의 방사성탄소연대 측정결과

5. 고찰

고대 백제 제철유적인 『충주 칠금동 392-5번지 일대 발굴조사』에서 출토된 탄화목재에 대하여 수종분석, 발열량조사, 방사성탄소연대측정을 실시하였다.

5.1 수종식별 및 발열량

충주 칠금동 392-5번지 일대 제철유적 발굴조사에서 출토된 탄화목 14점을 대상으로 수종 조사를 실시한 결과, 4호 유구(Ⅱ층, 8점), 3호 유구(V층, 2점), 7호 유구(V층, 3점)에서 출토된 탄화목재는 모두 상수리나무류(*Cerris* group)로 식별되었다. 5호 유구(V층, 1점)에서 출토된 탄화목재는 굴피나무(*Platycarya strobilacea* S. et Z.)로 식별되었다.

굴피나무는 경기도 이남지역의 산야에서 분포 생장하는 낙엽소교목으로 높이 12 m, 지름 50cm에 달한다. 수직적으로는 해발 50~1,200 m 사이에 분포한다. 기건비중은 0.68로 목재의 조직이 거칠지만 비교적 가공하기 쉬워 가구재, 나막신, 침목(枕木) 등으로 사용된다.⁴⁾

상수리나무류에는 상수리나무와 굴참나무가 속한다. 상수리나무는 낙엽활엽수로 수고 30 m, 직경 1 m까지 자라며, 표고 800 m이하의 산록에 분포한다. 건조지에서도 생장이 양호하며 내한성, 내조성이 강하여 해변가에서도 잘 견딘다. 내음성은 약하여 음지에서는 생육이 불량하다. 굴참나무는 낙엽활엽수로 수고 25 m, 직경 1 m에 달하며, 수피에는 두꺼운 코르크가 발달한다. 표고 50~1,200m에 생육하며 햇볕을 많이 받는 척박한 건조지에서도 잘 자란다. 내음성은 없지만 맹아력이 강하고 생장이 빠르다⁵⁾.

참나무류 중 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무가 분포하는 환경을 비교해보면 신갈나무의 경우 해발고에 따른 온도가 낮고 습한 곳에서 많이 분포하며 굴참나무는 온도가 높고 건조한 곳에서 많이 분포하고 졸참나무는 신갈나무와 굴참나무의 중간환경에 많이 분포하고 있다⁶⁾.

상수리나무류가 속한 참나무속 목재의 성질은 대체로 조직이 거칠지만 단단하고 강하다. 국내 상수리나무류 목재의 물리적, 기계적 성질을 살펴보면 기건비중은 0.81이고, 압축강도는 662 kgf/cm², 휨강도가 1,208 kgf/cm²이다. 목재의 용도로는 건축용재, 농기구, 상자, 세공 등의 기구용재, 가구용재 등이며, 수피로부터는 염료를 채취하고, 종자는 식용으로 활용되었다.⁷⁾

발열량 조사는 각 유구별로 1점씩 선발된 탄화목재로 실시하였지만, 탄화목재가 오랜

4) 이필우, 1997, “한국산 목재의 성질과 용도”, 서울대학교 출판부, p.93-94

5) 김세현 외, 2007, “한국의 유용수종 100선”, 국립산림과학원.

6) 이미정, 2007, 『우리나라 주요 참나무림의 군락구조분석 및 생태적 식재모델 연구』, 충남대학교 대학원 산림자원학과 석사학위논문

7) 이필우, 1997, “한국산 목재의 성질과 용도”, 서울대학교 출판부, p.137-138

기간 토양 중에 묻혀 있으면서 탄화목재의 화학적 특성에 변화가 발생하여 정확한 발열량 조사를 할 수 없었다. 하지만, 기 조사된 연구에 의하면 상수리나무류에 속하는 상수리나무와 굴참나무의 단위중량당 발열량은 각각 7,930 kcal/kg, 7,860 kcal/kg이고, 목탄톤당 원목소요량은 각각 4.8 m³/t, 4.4 m³/t으로 우수한 연료 재료임이 확인되었다.

5.2 연대측정

4호 제련유구에서 수습된 탄화목재는 많은 나이테(10개)를 보유하고 있어 위글매치를 이용한 방사성탄소연대 측정에 활용되었으며, 3호유구와 7호 유구에서 수습된 탄화목재는 나이테 수가 적고, 순서를 확인하기 어려워 탄화목재에서 1점씩의 시료를 채취하여 일반적인 방사성탄소연대 측정을 실시하였다.

4호 제련 유구에서 출토된 탄화목(CJ ③, 상수리나무류, 잔존 나이테의 수: 10개) 시료로부터 2개의 시료(1~2번째, 9~10번째 연륜)를 채취하여 wiggle match를 이용한 방사성탄소연대 측정한 결과, 95.4% 신뢰구간에서 AD 237~268년(41.8%), AD 283~333년(53.6%)으로 산출되었다.

3호 유구(CJ ⑩, 상수리나무류)와 7호 유구(CJ ⑭, 상수리나무류)에서 출토된 탄화목재는 95.4% 신뢰구간에서 각각 AD 132~238년, AD 130~235년으로 산출되어 동시대의 유구로 확인되어 4호 제련유구 보다는 약 100년 정도 앞서는 것으로 분석되었다.

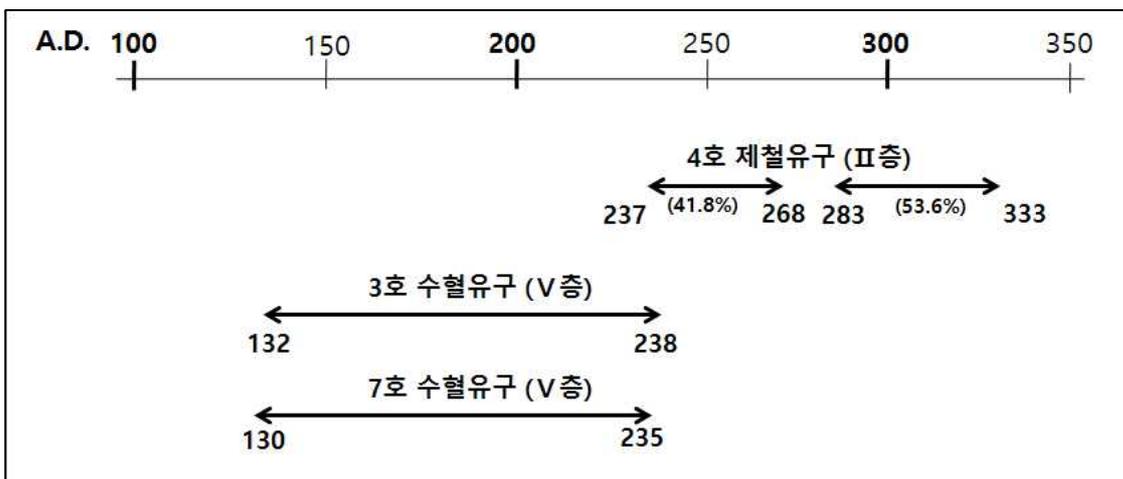


그림 23. 95.4% 신뢰구간에서의 방사성탄소연대분석 결과

위와 같은 연대측정 결과는 발굴조사 결과와 일치하는 것으로 V층에 해당하는 층위

(3호 유구, 7호 유구)가 먼저 형성이 되고, 이 후에 II층(4호 제철유구)이 형성되면서 가마를 만들어 사용과 폐기를 반복하면서 장기간 동일한 위치에서 철 생산이 이루어졌음을 과학적으로 증명할 수 있었다.



그림 24. 조업면 간 층위퇴적 양상 모식도
 (출처: 발굴조사 현장설명회 자료집, 2016.6, 국립중앙문화재연구소)