한반도 남부지역 출토 조선시대 노벽의 과학적 분석

Scientific Analysis for Furnace Walls of the Joseon Dynasty Excavated in Southern Region of the Korean Peninsula

장원진, 한민수*

한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과

Won Jin Jang, Min Su Han*

Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage

Received November 20, 2021

Revised December 6, 2021

Accepted December 8, 2021

*Corresponding author

E-mail: dormer@korea.kr

Phone: ++82-41-830-7381

Journal of Conservation Science
2021;37(6):807-820

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.6.18>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 본 연구에서는 한반도 남부지역에서 출토된 조선시대 노벽을 대상으로 자연과학적 분석을 통해 지역 간 재료나 배합비율, 피열온도 등 상관성 및 차이점을 파악하고자 하였다. 전라 지역의 김제 은곡, 남원 성산리 투구봉, 화순 쌍산 항일의병 유적과 경상지역의 고성 소울비포 성지, 함천 야로 유적에서 출토된 노벽을 선정하여 분석하였다. 분석 결과, 소성의 정도에 따라 층위변화가 존재하며, 고성 노벽은 2개의 층위, 나머지 유적 노벽은 3개 층위로 구성되었다. 김제 은곡과 성산리 투구봉, 함천 야로 유적은 각상의 입자상, 성산 유적은 아각상, 고성 유적은 아원마상의 입자상을 보여 지역에 따라 특징적인 차이는 아니었다. 유적에 따라 피열온도는 1300°C와 1100°C 정도로 구분되었으나 이 또한 지역에 따라 나타나는 현상은 아니었다. 주요 성분함량에서 TiO₂는 대부분의 시료가 1%를 넘지 않아 사철제련이 아니거나 저티탄 사철을 사용한 노였을 것으로 추정되었다. 지역 간 유사성은 크지 않으며, 유적의 성격과 제철원료, 노벽을 구성하는 원재료의 성분조성에 따라 상관성이 지어지는 것으로 보인다.

중심어 노벽, 제련로, 사철, 조선시대, 피열온도

ABSTRACT A study on the Joseon Dynasty's furnace walls, excavated from south Korea, was conducted to identify the correlations and differences of the furnace walls found in Jeolla and Gyeongsang regions. Three ruins in the Jeolla region and two in the Gyeongsang region were selected for the analysis. The results showed a layer change depending on the degree of plasticity and difference in the number of layers and particle phase. Furthermore, although the temperature to be subjected to heat was divided into 1300°C and 1100°C, it was not a phenomenon that appeared according to the region. Additionally, analysis result of major components revealed that the TiO₂ content of most samples does not exceed 1wt%. This means that the furnace did not smelt iron sand or smelted it into low-titanium sand. This study indicated a slight similarity between the furnace walls found in the two regions, and the correlation was determined based on the nature of the ruins, raw materials of the metals ores, and composition of the raw materials constituting the furnace walls.

Key Words Furnace wall, Smelting furnace, Iron sand, Joseon Dynasty, Firing temperature

1. 서 론

한반도 철기문화는 중국의 발달된 철기문화가 대부분 이 그대로 한반도에 유입되어, 유구에서 출토되는 중국계 유물을 근거로 빠르게는 기원전 43세기경으로 보고 있으며, 제철기술은 늦어도 기원전 1세기 후반에는 한반도 동남부 지역에 독자적인 철기의 제조기술이 정착되어 있었다(Kim, 2003). 한반도 제철기술의 기원시기와 발전에 대

해 아직 쉽게 단정지를 수 없으나, 주조 기술을 중심으로 이어지는 중국의 제철 기술사와 단조 기술을 중심으로 이어지는 한반도의 제철 기술사는 차이를 보이며, 독자적인 발전을 일군다.

한반도 제련로의 형태적 발전은 반지하식 원형로를 기반으로 하는 반지하식 제련로가 반지하식 방형로-반지하식 상형로로 발전하며, 조선시대에 새로운 유형의 석축형 제철로 또한 등장한다(Choi, 2021). 제련로의 형태 변화는

노벽 재료의 변화도 야기했는데, 특히 조선시대 상형로의 경우, 노벽 재료를 점토만으로 한정하지 않고 석재를 추가하여 축조하였다. 제련로의 양 단벽으로 석재를 사용해 노벽을 고정하는 작업은 노의 구조적 안정성을 더하고, 노 내 생산물을 꺼낼 때 단벽 만을 제거하여 반영구적인 생산을 가능케 하였다(Jeonnam Cultural Heritage Research Institute, 2017).

이러한 제련로의 형태적 변화들이 노벽 구성재료의 변화를 야기했는가를 이번 연구로 확인하고자 하였다. 중국의 경우에는 지역과 시대별로 유적을 분류하여 고고학적 조사와 보존과학적 분석의 교차연구를 통해 학제 간 융합을 시도하여 어느 정도 정립되었으나(Liu *et al.*, 2017) 국내 연구에서는 그 사례가 드물며(Han, 1993; Cho *et al.*, 2013; Lee, 2015; Hong, 2015), 앞서 언급했듯 한반도와 중국 간 주요 철 생산품의 차이가 존재하기 때문에 연구를 진행하고자 하였다.

본 연구에서는 조선시대 한반도 남부지역에 위치한 유적으로 한정하여 분석을 실시하였으나 이와 같은 연구들이 축적되어 노의 형태와 재료, 나아가 노의 성격을 규명할 수 있는 기본 자료들이 될 수 있을 것으로 전망한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

본 연구에서 분석한 노벽은 전라지역에서 출토된 김제 장흥리 은곡 유적, 남원 성산리 투구봉, 화순 쌍산 향일의병 유적 노벽과 경상지역에서 출토된 고성 소을비포성지, 합천 야로 유적 노벽이다(Figure 1).

김제 은곡과 화순 쌍산 향일의병 유적 출토 노벽은 유구와 유물의 편년을 통한 조업시기를 추정한 결과, 18세기에 운영된 반지하식 상형제련로로 판단된다. 원료는 사철을 이용했을 것으로 추정되며, 노를 축조할 당시에 점토블럭을 쌓아 제작했고, 이를 고정하기 위한 지지체가 존재한 흔적들이 확인되었다. 이를 바탕으로 사철을 이용해 괴련철을 생산한 제련로로 고찰하였다(Korea Cultural Heritage Research Center, 2011; Jeonnam Cultural Heritage Research Institute, 2017). 남원 성산리 노벽은 해당 유적에 대한 지표조사만 이루어져, 시대적인 배경을 파악할 수 없지만 인접한 남원 고기리 유적이 조선시대 유적이며(Jeonju Cultural Heritage Research Institute, 2016), 슬래그에서 Leucite가 검출되었고, 조직이 유사하다는 공통점이 있어(Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2018) 조선시대 노벽과 비교하고자 하였다. 고성

소을비포성지 발굴조사 결과, 1호는 철재 폐기장, 3호는 원형 정련로지로 판단되었으며, 조업시기는 17~18세기 대로 추정된다(Foundation of East Asian Cultural Properties Institute, 2007). 합천 야로 노벽은 폐기장 수습 노벽이나 유적 내에 원형로의 제련시설이 존재하며, 주변 채집 유물을 보았을 때(Shin, 2006), 조선시대에 운영된 원형로였을 것으로 추정된다.

따라서 6점의 노벽 시료 분석을 통해 한반도 남부지역 조선시대 제철산업의 특성을 파악하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대되며, 시대 미상의 노벽으로 분류된 남원 성산리 노벽의 시대구분 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2.2. 연구방법

충위별 기공과 입자의 분포 및 크기, 색상, 구성광물 등을 확인하고자 마운팅 시편을 제작하여 편광현미경(Eclipse lv100n pol, Nikon, JPN)에서 미세조직을 관찰하였으며, 구성광물을 확인하고자 충위를 구분하여 다이아몬드 디스크휠로 일부를 채취하여 분말화 한 후 시료 홀더에 담아 X-선 회절분석기(Miniflex, Rigaku, JPN)로 결정구조분석을 실시하였으며, 분석조건은 분석 조건은 40kV, 15mA, 5°~80°, 2°/1min이다. X-선형광분석은(S8 Tiger, Bruker, USA) 열처리된 분말화 시료 1.0 g + X-Ray flux (lithium tetraborate 66% : lithium metaborate 34%) 10g을 혼합하여 비드머신에서 1000°C로 녹여 glass bead를 만들고, 가속전압 30~60kV, 전류 67~135 mA를 가하여 정량 분석하였다. 노벽의 열적 특성을 확인하기 위하여 시차열중량분석기(SDT 650, TA instrument, USA)를 이용하였다. 온도범위 50~1200°C, 승온속도는 20°C/min으로 분석조건을 설정하였다.

3. 연구 결과

3.1. 단면관찰

연구대상 노벽들의 일부를 채취하여 단면관찰을 실시하였다. 모든 시료에서 제철 조업으로 인해 생성된 흑색 탄화층과 비소성층이 구분되었으며, 육안으로 확인되는 거정질의 백색 광물이 모든 층에 고르게 분포하는 것을 확인하였다. 전라지역 노벽 중 김제 장흥리 은곡과 화순 쌍산 향일의병 유적 시료는 내부층과 중간층, 외부층이 연속적으로 존재하였으며, 색상으로 쉽게 구분이 가능하였다. 반면에 남원 성산리 시료는 내부 소성층이 중간 토양

Figure 1. Picture of furnace wall in the southern part of the Korean Peninsula (JE: Kimjae Jangheung-ri Eungok Ruins, ST: Seongsan-ri Tugubong, SS: Hwasun Ssansan Anti-Japanese Army ruins, GO1 · GO3: Goseong Soeulbipo fortress ruins, SKK: Hapcheon Yaro ruins).

층을 감싸는 형태로 구성되어 있어 나머지 두 시료와는 다른 양상을 보였다. 경상지역 노벽에선 합천 야로 유적 노벽만 내부층, 중간층, 외부층이 연속적으로 존재하였고, 고성 소을비포성지 유적의 노벽들은 내부층과 외부층만으로 구성되어 있었다. 고성 1호 노벽의 내부층 중앙에 위치한 장방형의 거대한 백색 입자를 임의로 중간층으로 명명하여 관찰했다.

김제 장흥리 은곡 시료는 3개의 층위로 구분이 가능하며, 색상을 제외하고는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 외부층과 중간층에서도 철 성분의 영향으로 인해 생성된 것으로 보이는 흑색의 흡착물 등이 확인되어 제철조업의 영향이 외부층까지 미쳤음을 확인했다. 남원 성산리 투구봉 시료는 흑색 내부층이 외부 토양을 감싸는 형태였기 때문에 다른 노벽 시료와 같은 중간층이 형성되지 않은 것으로 추정된다. 내부층에서 블로팅 현상이 나타나는 것과 중간층에서 철 성분이 흡착되어 있는 것은 김제 장흥리 은곡 시료와 같은 특징을 보인다. 화순 쌍산 향일의병 유적 노벽은 내부층보다 안쪽에 위치한 슬래그층이 확인되었다. 침상의 크림색 바탕층과 철 슬래그로 보이는 흡착물이 다수 관찰되었으며, 외부층과 중간층에서 확인되던 백색의 거정질 입자가 내부층과 슬래그층에서는 확인되지 않았다.

고성 소을비포성지 1호 노벽은 흑색 내부층과 적갈색의 외부층이 명확하게 구분되며, 내부층 한가운데 거대한 장방형의 백색 입자가 존재한다. 단면에 분포하고 있는 조립질 입자는 아원마상이며, 현미경상에서 확인되는 백색의 작은 점과 같은 입자가 특징이다. 고성 소을비포성지 3호 노벽은 다수의 비소성 외부층과 일부 흑색에 가깝게 변색된 내부층으로 구성된 단면을 보였다. 색상을 제외하고 층위 간 큰 차이가 존재하지 않으며, 1호와 마찬가지로

지로 내부층과 외부층에서 모두 백색의 작은 점과 같은 입자가 확인되었다. 합천 야로 유적 노벽은 내부층, 중간층, 외부층으로 구분되며, 장방형과 원형의 조립질 입자들이 전체적으로 분포하는 특징이 관찰된다(Table 1, Figure 2).

3.2. 결정구조

노벽의 결정구조 분석 결과, 모든 시료에서 노벽 제작 시 사용되는 토양 원재료에서 기본적으로 확인되는 석영(Quartz)이 확인되었으며, 나머지 성분은 시료와 그 층위에 따라 다르게 나타났다.

김제 장흥리 은곡 시료의 외부층에서는 일반적인 토양 구성광물인 석영과 장석(Microcline/Albite), 운모(Mica)가 확인되었으나, 중간층부터 장석 피크가 급격하게 감소하며, 물라이트(Mullite) 피크가 확인되어 피열을 받은 것을 확인할 수 있었다. 내부층은 헤르시나이트(Hercynite)와 자철석(Magnetite) 피크가 나타났으며, 고온으로 피열됨과 동시에 슬래그 성분에 의한 영향이 있음을 확인했다.

남원 성산리 투구봉 노벽의 분석 결과, 외부 토양층과 그것을 둘러싸고 있는 내부층으로 구성된 시료였는데, 외부층의 경우에는 김제 장흥리 은곡 시료와 마찬가지로 일반적인 토양의 구성 광물들이 확인되었으나 운모류 광물이 확인되지 않아 차이를 보였다. 내부층은 모두 헤르시나이트가 확인되어 고온으로 피열됐음을 확인하였고, 내부층-2는 자철석과 철감람석(Fayalite) 피크가 추가로 확인되어 상대적으로 슬래그에 의한 침투가 존재했을 것으로 추정된다.

Table 1. Microscope image results of the furnace wall

Classification Sample Group	Furnace type	Layer			Particle shape	Etc
		Inner	Middle	Outer		
JE	Smelting furnace	●	●	●	Angular	
ST	Unknown	● ●		●	Angular	
SS	Smelting furnace	●	●	●	Subangular	Slag layer exists
GO1	Dump site	●	○	●	Subround	Middle layer(white minerals of rectangular is existed in the firing layer)
GO3	Reducing furnace	●		●	Subround	White small particle distribution
SKK	Dump site	●	●	●	Angular

Figure 2. Microscope images of the furnace wall in the southern part of the Korean Peninsula.

화순 쌍산 항일의병 유적 노벽의 분석 결과, 외부층에서는 석영과 적철석(Hematite), 장석이 확인되었으며, 중간층부터 적철석과 몰라이트가 확인되어 피열을 받은 것을 확인하였다. 내부층은 몰라이트와 철감람석 그리고 크리스토파라이트(Cristobalite)로 구성되어 고온의 피열과 제련과정

에서 부족한 철 성분의 영향을 받은 것으로 추정된다.

고성 소을비포성지 1호 유적 노벽은 외부층에 석영, 적철석, 장석이 확인되었으며, 중간층부터 물라이트가 확인되어 피열을 받은 것으로 확인되었다. 내부층에서 크리스토파라이트와 자철석 피크가 함께 나타나 고온으로 피열된

Table 2. The results of XRD analysis for the furnace walls

[illegible]

과 동시에 슬래그 성분에 의한 영향이 있음을 확인하였다.

고성 소슬비포성지 3호 유적 노벽은 현미경상으로 확인하였을 때, 2개의 층위로 분류되었다. 석영, 장석, 운모와 함께 고령석(Kaolinite)과 브루카이트(Brookite)가 외부층에서 확인되었으며, 내부층에서도 성분 변화 없이 intensity만 약간 감소한 채로 동일한 결과를 보였다. 소성 지시광물이 확인되지 않아 고온으로 인한 피열을 받지 않은 것으로 추정된다.

합천 야로 유적의 노벽 분석 결과, 석영과 장석, 물라이트 등이 외부층에서 확인되어 피열을 받은 것으로 확인되었다. 중간층은 비소성층과 검출되는 광물이 동일하였으며, intensity의 차이만 존재하였다. 내부층의 경우에는 크리스토팔라이트와 자철석 피크가 확인되어 고온으로 피열됨과 동시에 슬래그 성분에 의한 영향이 있음을 확인하였다(Table 2, Figure 3).

Figure 3. X-ray diffraction patterns of the furnace walls (Qz: Quartz, F: Feldspar, Mi: Mica, Mu: Mullite, He: Hematite, Mag: Magnetite, Her: Hercynite, Cb: Cristobalite, F: Faylite, Bk: Brookite, Kl: Kaolinite).

Figure 4. WD-XRF graphs of the furnace wall.

Table 3. The eigenvalues, contribution rates, and cumulative contribution rates by principal component analysis in content of major components

Components	Eigenvalues	% of variance	Cumulative %
1	3.895	38.951	38.951
2	1.959	19.588	58.539
3	1.532	15.323	73.862
4	0.986	9.864	83.726
5	0.530	5.303	89.029
6	0.427	4.271	93.301
7	0.329	3.287	96.588
8	0.236	2.362	98.950
9	0.080	0.796	99.746
10	0.025	0.254	100.000

Table 4. Principal component analysis component matrix for the content of the major components

Variable	Component 1	Component 2	Component 3
Al ₂ O ₃	0.160	-0.777	0.383
CaO	0.568	0.559	0.411
Fe ₂ O ₃	0.671	0.372	-0.378
K ₂ O	-0.494	0.408	0.050
MgO	0.805	0.042	0.305
MnO	0.708	0.552	0.405
Na ₂ O	-0.654	0.500	0.021
P ₂ O ₅	0.615	-0.409	0.215
SiO ₂	-0.444	-0.017	0.792
TiO ₂	0.838	-0.113	-0.376

3.3. 화학적 특성

한반도 남부지역 출토 노벽 약 1 g을 WD-XRF로 분석하여 주요 성분의 함량을 분석하였으며, 표와 그래프로 제시하였다(Table 5, Figure 4). 주요 성분 10가지를 분석하였으며, 평균적으로 Al₂O₃ 16.74 wt%, CaO 0.95 wt%, Fe₂O₃ 7.6 wt%, K₂O 3.14 wt%, MgO 1.1 wt%, MnO 0.08 wt%, Na₂O 0.79 wt%, P₂O₅ 0.16 wt%, SiO₂ 62.44 wt%, TiO₂ 0.56 wt%의 값을 보였다.

분석된 성분 함량을 이용하여 시료 간의 재료학적 상관 특성을 확인하고자 통계분석 프로그램인 IBM SPSS를 활용한 주성분 분석 및 판별분석을 수행하였다.

먼저 주요 성분의 함량을 가지고 주성분 분석(principal component analysis)을 실시한 결과, 전체 그룹에 대해 계산된 고유값 및 기여율은 Table 3과 같다. 주성분 1은 기여율이 38.951%, 주성분 2는 19.588%, 주성분 3은 15.323%로 나타났으며, 주성분 1~3의 누적기여율은 73.862%

Figure 5. Component diagram drawn using a component matrix.

Table 5. The contents of major components for furnace walls in the southern part of the Korean Peninsula (wt%)

Components Sample	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I	Total
JE inner	11.26	0.41	13.24	3.51	0.40	0.03	0.81	0.03	51.27	0.53	18.50	100
JE middle	13.42	0.34	2.00	3.42	0.47	0.02	1.02	0.01	56.31	0.19	22.79	100
JE outer	15.53	0.38	2.02	4.27	0.41	0.02	1.24	0.01	67.22	0.23	8.67	100
ST inner-1	15.87	1.17	9.44	3.89	0.85	0.08	1.71	0.04	65.97	0.57	0.40	100
ST outer	16.30	1.00	4.22	2.86	1.00	0.06	1.29	0.03	60.61	0.40	12.24	100
ST inner-2	12.22	1.65	12.68	2.43	1.52	0.13	0.78	0.06	42.73	1.27	24.52	100
SS inner	14.98	1.03	14.62	4.23	1.52	0.12	0.40	0.09	62.50	0.50	0.00	100
SS middle	19.28	0.19	6.60	3.62	1.64	0.07	0.42	0.04	66.71	0.53	0.89	100
SS outer	18.30	0.19	6.68	3.55	1.62	0.07	0.39	0.05	66.76	0.58	1.80	100
GO1 inner	17.61	3.63	9.12	3.26	1.84	0.22	0.60	0.41	62.72	0.59	0.00	100
GO1 middle	10.23	1.33	7.19	2.46	1.37	0.12	1.24	0.17	75.21	0.37	0.31	100
GO1 outer	18.82	1.11	8.63	2.71	1.41	0.14	0.38	0.39	63.65	0.70	2.07	100
GO3 inner	20.91	0.73	7.94	2.30	1.32	0.04	0.22	0.97	57.08	0.91	7.56	100
GO3 outer	22.30	0.54	9.34	2.11	1.47	0.06	0.20	0.20	55.35	0.82	7.60	100
SKK inner	16.80	1.21	7.98	2.82	0.72	0.09	0.80	0.12	68.87	0.59	0.00	100
SKK middle	20.39	0.63	3.92	2.84	0.64	0.03	0.98	0.02	69.15	0.38	1.01	100
SKK outer	20.26	0.55	3.66	3.12	0.55	0.03	1.00	0.02	69.33	0.37	1.12	100

Figure 6. Discriminant analysis graph of the furnace walls.

이다. 또한 Table 4와 Figure 5는 데이터를 해석함에 있어 이들 상관계수들은 어느 성분이 많으며, 어떤 성분이 그룹을 분리하는 데 영향을 주는지를 보다 쉽게 알 수 있다 (Noh, 2005). 성분 1에서 TiO₂와 같은 성분이 Al₂O₃와 같은 성분들에 비하여 상대적으로 기여하는 것이 크다는 것을 알 수 있다.

Figure 6는 판별분석(discriminant analysis)을 이용하여 출토 노벽을 정준판별함수로 도식화하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 집단 중심값이 일치하지 않아 응집되어 있지 않고, 출토 위치에 따라 구분된다. 즉, 노벽의 축조과정에서 다른 재료와 배합비율을 가진 원료를 사용하였으며, 유적에 따라 주요성분의 변화를 확인할 수 있다. 예외

Table 6. Weight reduction rate for TG-DSC graphs of furnace walls (%)

Sample	Weight reduction rate	Sample	Weight reduction rate
JE inner	-0.17	GO1 inner	0.624
JE middle	0.565	GO1 middle	0.994
JE outer	0.872	GO1 outer	3.076
ST inner-1	0.024	GO3 inner	9.403
ST outer	1.506	GO3 outer	9.513
ST inner-2	-0.27	SKK inner	0.536
SS inner	0.103	SKK middle	1.608
SS middle	1.009	SKK outer	1.719
SS outer	1.86		

적으로 고성 소을비포성지 1호와 3호 유적만 집단 중심값이 가까워 공방지는 달라도 동일 유적에서는 유사한 배합비율로 노를 제작했을 것으로 보인다.

3.4. 열분석

출토 노벽의 지역에 따른 열중량-시차주사열량분석(TG-DSC) 결과는 Figure 7, 8과 같다. 모든 시료에서 석영의 상전이 피크인 573°C의 흡열피크가 확인되나 고성 소을비포성지 3호 노벽의 경우에는 굉장히 희미하게 피크가 형성되어 있다. 또한 약 500°C에서 나타나는 흡열피크와 900°C 부근에서 나타는 물라이트 발열피크를 보았을 때 상대적으로 피열을 받지 않은 시료로 추정된다. 노벽의 층위 따른 결과는 Figure 9, 10과 같으며, 이 역시 고성

소을비포성지 3호 노벽을 제외하면 유사한 결과값을 보인다. 유적과 관계없이 내외부층 모두 유사한 값을 보였고, 그래프상에서는 석영 상전이 피크를 제외한 나머지 피크가 확인되지 않았다.

중량감소율의 경우, 대부분의 시료가 0~3%의 범위에 위치하나, 고성 소을비포성지 3호 노벽의 경우에는 9.5% 부근에 위치해 다른 노벽에 비해 높은 값을 보였다(Table 6).

따라서 열흐름 그래프에 따르면 내외부 시료 모두 1000°C 이상의 피열을 받은 것으로 보여지며, XRD 결과에서 높은 온도에서 소성된 광물이 확인된 것과 유사한 결과이다. 다만, 열흐름 그래프에서 내외부층의 차이가 많지 않아 한계가 있었다.

Figure 7. TG-DSC graphs of furnace walls in the Jeolla region.

Figure 8. TG-DSC graphs of furnace walls in the Gyeongsang region.

Figure 9. TG-DSC graphs for inner layer of furnace walls.

4. 고찰 및 결론

노벽의 경우, 정확한 출토 위치가 확인되지 않으면 미세조직과 성분분석을 시행하더라도 해당 노벽과 유적의 특성을 파악하기 어려우나, 이번 연구의 대상이 된 노벽은 대부분 발굴보고서가 발간되어 있고, 유적의 특성에 대한 고고학적 고찰이 이루어져 이번 연구에 활용하였다.

김제 장흥리 은곡유적 노벽은 자연과학적 분석을 통해 1100°C 부근에서 확인되는 물라이트와 열분석 그래프를 참고했을 때, 저온환원 제철법 이용하여 괴련철을 생산한

제련로임을 밝힌 고고학적 연구와 일치한다. 또한 노벽의 TiO_2 의 함량을 이용하여 사철 제련 여부를 파악하는 기존의 연구방법을 적용했을 때, 내부층이 0.528%의 함량을 보여 0.99%로 밝혀진 원료시료의 1/2 정도로 나타나 낮은 수치이지만 다른 시료와 비교했을 때, 유의미한 값을 보인다. 이는 저티탄 사철을 원료로 이용해 제련을 실시했을 것이라는 기존의 견해와 같다.

화순 쌍산 향일의병 유적 또한 김제 장흥리 은곡유적과 같은 상형으로 파악되나, 결정구조 분석과 열분석을 통해 노벽의 피열온도는 1300°C 이상으로 추정된다. 지리

Figure 10. TG-DSC graphs for outer layer of furnace walls.

적 요인과 TiO_2 함량 등을 이유로 철광석을 원료로 사용하였을 것으로 고찰(Jeonnamm Cultural Heritage Research Institute, 2017)되었으나 일부 슬래그의 미세조직 등에서 사철의 특징이 나타나며, 소성층에서 TiO_2 함량이 0.498% 이고, 철재의 평균 TiO_2 함량이 0.91%임을 감안 했을 때, 함량의 약 1/2이 검출된 것으로 보아 저티탄 사철을 원료로 사용했을 가능성을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

성산리 투구봉은 보고서가 존재하지 않으며, 시료는 투구봉 복기습 지표 채토과정에서 획득하여 노의 성격과 생산품을 추정하기는 어려움이 따른다. 다만, 단면관찰 결과에서 앞서 조사한 시료들과 유사하며, 내부층은 모두 1100°C 이상의 피열을 받았을 것으로 추정된다. 내부층-2는 결정구조분석에서 철감람석의 존재도 확인되며, WD-XRF에서도 내부층-2가 상대적으로 높은 Fe_2O_3 값을 보여 최종적으로 제철조업에 영향을 받은 부분은 내부층-2로 추정된다.

고성 소을비포성지 유적은 단면관찰 결과에서 확인할 수 있듯이 1호와 3호에서 공통적으로 확인되는 백색의 작은 점과 같은 입자가 특징이다. 폐기장 유적으로 고찰된 1호 노벽은 1300°C 이상의 피열을 받은 것으로 보이며, 정련로 유적의 3호 노벽은 고온지시광물의 부재와 열분석 그래프의 형상을 미루어보아 상대적으로 낮은 피열을 받았을 것으로 추정된다. 3호 노벽은 다른 노벽들에 비해 피열온도가 현저히 낮으며, 소결된 점토의 특징을 보이지 않으므로 노벽이 아니거나 정련로의 최외곽 부위에서 채취한 시료일 가능성이 있다.

합천 야로 유적은 조선시대 운영된 원형제련로로 금번

의 연구에 활용된 노벽은 폐기장 수습 노벽이나 제련로와 연관성이 있을 것으로 보인다. 노벽의 피열온도는 1300°C 이상으로 보이며, 외부층에서도 물라이트가 확인되어 상대적으로 높은 피열을 받았거나 여러 번 사용됨에 따라 고온성 광물이 생성되었을 것으로 추정된다. 세종실록지리시와 경상도속찬지리지에 따르면 해당 유적 일대는 사철이 토산품이었다는 기록이 존재하므로 제철원료가 사철일 가능성이 높다. 소성층의 TiO_2 함량은 0.588%로 나타나 사철제련을 실시하였다면 김제 장흥리 은곡유적과 같은 저티탄 사철을 사용했을 것으로 추정된다. 하지만 선행된 분석 연구(Shin *et al.*, 2006)에 따르면 노벽편에 대한 TiO_2 의 함량이 2.35%와 0.64%로 편차가 크기 때문에 데이터의 해석에 보다 주의가 필요할 것으로 보인다.

제철 부산물인 슬래그 내에 존재하는 TiO_2 함량은 기존의 연구에서 사철 제련의 증거로서 활용이 되었으나(Yoon, 1986; Choi *et al.*, 1994), 노벽의 경우에는 TiO_2 함량을 이용한 제련 원료의 추정을 한 사례가 드물어(Korea Cultural Heritage Research Center, 2011) 이번 연구에서 해석을 시도하였다. 노벽에 포함된 TiO_2 함량을 이용해 제철 원료의 추정한 결과, 대부분의 시료가 1%를 넘지 못하고 낮은 값을 보여 사철제련이 아니거나 저티탄 사철을 사용했을 것으로 추정되었다. 다만, 고고학적 연구를 통해 사철 제련을 실시했을 것이라고 추정되는 김제, 함천의 경우에는 내부층과 외부층 간의 격차가 약 2배 정도이며, 이는 원료가 사철로 고려되지 않는 타 지역 노벽에 비해 상대적으로 큰 차이를 보인다. 이와 같은 논리로 원료가 불명인 성산 투구봉 유적을 접근하면, 외부층과 내

부층-2 간 함량이 약 3배 차이가 나므로 사철제련을 했을 가능성도 존재한다. 반면, 층위에 따라 TiO_2 함량 차이를 보이지 않은 고성 소을비포성지 3호 노벽은 사철제련의 영향이 아닌 토양 내에 존재하는 브루카이트의 영향으로 인한 결과로 추정된다.

피열온도에 의한 분류로는 1300°C 이상의 피열을 받은 유적은 화순 쌍산 향일의병 유적, 고성 소을비포성지 1호, 합천 야로 유적 노벽이며, 1100°C 부근의 김제 장흥리 은곡, 성산리 투구봉 그리고 500°C 이하의 고성 소을비포성지 3호 노벽으로 분리된다. 같은 원료를 사용했을 것으로 추정되더라도 피열온도의 차이가 확인되며, 이는 해당 유적의 성격에 따라 발생한다. 1300°C 이상에 해당하는 유적은 선철을 생산했을 가능성이 높으며, 1100°C 부근의 유적은 괴련철 생산을 목적으로 했을 가능성이 높아보인다.

또한 일부 노벽편에서 확인되는 송풍구의 형태를 통해 피열온도에 대한 설명이 가능하다. 노벽에 대한 상세한 정보가 담겨 있는 김제 장흥리 은곡과 화순 쌍산 향일의병 유적 보고서의 경우, 송풍관의 관입각도에 대한 서술이 존재한다. 김제 장흥리 은곡의 경우, 노 바닥 기준 수평에 가까운 각도이며, 화순 쌍산 향일의병 유적 노벽은 송풍방향이 사선인데, 이와 같은 송풍구의 관입각도 차이 또한 화순 쌍산 향일의병 유적 노벽의 피열온도 상승에 영향을 미쳤을 하나의 요인으로 추정된다. 이러한 결과는 사례가 아직 적기 때문에 추가적인 연구와 분석을 통해 밝혀나가야 할 것으로 생각된다.

고성 소을비포성지 1호와 3호 노벽은 현미경상 특징과 주요성분 함량의 판별분석 결과를 통해, 피열온도의 차이가 크에도 불구하고 상당히 유사한 특징을 보였다. 이같은 결과는 출토 위치가 달라도 동일유적 내라면 유사한 재료와 배합비율을 사용하여 노를 제작했을 가능성을 제시한다. 고성 소을비포성지와 같은 사례가 이례적일 가능성도 존재하므로 단정 지어 판단하기보다는 다른 유적지의 추가적인 시료와 연구를 통해서 풀어가야 할 것으로 사료된다.

결론적으로 이번 노벽의 지역 간 유사성은 크지 않으며, 유적의 성격과 제철원료, 노벽을 구성하는 토양의 성분조성에 따라 상관성이 있는 것으로 보인다. 피열온도는 지역에 따른 기술력의 차이라기보단 해당 유적의 성격에 의한 것으로 판단되며, 지역에 따라 명확하게 온도 구분이 되는 것이 아니므로 지역 간 차이로 볼 수 없다. 주요 성분 함량을 이용한 제작재료의 상관성에서도 고성 소을비포성지 출토 노벽을 제외한 나머지 유적 간 상관성이 부족하여 조선시대 노벽의 지역에 따른 분류는 보다 많은

자료를 통해 추정할 수 있을 것이다.

이번 연구에 한반도 남부지역, 조선시대 유적에 한정하여 지역적 차이에 따른 유적출토 노벽의 특징을 비교하였으며, 추후 노벽의 시대에 따른 변화와 지역에 따른 변화의 차이를 보다 정확히 파악하기 위한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 이공분야기초연구사업 중 보호연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2020R111A2072253)이며, 시료를 제공해 주신 국립중앙문화재연구소에 감사드립니다.

REFERENCES

- Cho, H.K., Cho, N.C. and Kang, D.I., 2013, Scientific analysis of slags and furnace wall collected from iron production site at Suryong-ri Wonmorongi in Chungju. *Journal of Conservation Science*, 29(2), 139-147. (in Korean with English abstract)
- Choi, J., Kim, S.C. and Do, J.M., 1994, Metallography of iron slag excavated from Bongsan-dong, Yeosu city in the period of the 16th to 19th century. *Journal of Conservation Science*, 3(1), 13-18. (in Korean with English abstract)
- Choi, Y., 2021, Development of medieval iron production technology. *Korean Middle Ages and Archeology*, (9), 73-106. (in Korean)
- Foundation of East Asian Cultural Properties Institute, 2007, Goseong Soeulbipo fortress site cultural relics excavation report. (in Korean)
- Han, S.M., Kim, K.N. and Shin, D.Y., 1993, Basic research on fire-resistance materials for the Kalcheon-ri furnace. *Journal of Conservation Science*, 2:2, 25 30. (in Korean with English abstract)
- Hong, J.H., 2015, Metallurgical study of slag from Gwanbuk-ri remains, Buyeo. *Kongju National University, Gongju*, 1-103. (in Korean with English abstract)
- Jeonju Cultural Heritage Research Institute, 2016, Namwon Gogi-ri steel remains. 1-190. (in Korean)
- Jeonnam Cultural Heritage Research Institute, 2017, Hwasun Ssangsan anti-japanese army remains. 1-242. (in Korean)
- Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2018, Scientific analysis report on the specimens excavated from archaeological iron sites in Jeonra region. 1-202. (in Korean with English abstract)

- Kim K.I., 2003, A study on ancient steelworks in South Korea. Hanshin University Graduate School, 1-109. (in Korean)
- Korea Cultural Heritage Research Center, 2011, Eungok steel ruins in Jangheung-ri, Gimje. 1-84. (in Korean)
- Lee, E.W., Lee, J.J., Chae, M.H. and Kim, E.J., 2015, Examination of smelting and smithing slags excavated from the Iron Production Site of the Nogye Village. Journal of Conservation Science, 31(4), 411-427. (in Korean with English abstract)
- Liu, H.F., Qian, W., Chen, J.L., Chen, H.L., Matthew, L.C. and Michael R.N., 2017, Cast iron-smelting furnace materials in imperial China: Macro-observation and microscopic study. Journal of Archaeological Science, 86, 50-59. (in English)
- Noh, H., 2005, Multivariate analysis theory and practice using Excel and SPSS. Hyeongseol Publishing House, 84-109. (in Korean)
- Shin K.H., 2006, Hapcheon Yaro and Steel Ruins. Hapcheon Yaro Yacheolji Prospecting Investigation Report, Gyeongnam Archaeological Research Institute. (in Korean)
- Shin, K.H., Lee, N.K. and Jang, K.S., 2006, Analysis and study of materials related to the production of Yarori Yacheolji in Hapcheon. Hapcheon Yaro Yacheolji Pond Investigation Report, Gyeongnam Archaeological Research Institute. (in Korean)
- Yoon, D.S., 1986, On the slag produced in early iron metallurgy. The Journal of the National Academy of Science, 25, 380-390. (in Korean)