Research Paper

Interpretation of Firing Temperature and Thermal Deformation of Roof Tiles from Ancient Tombs of Seokchon-dong in Seoul, Korea

Hong Ju Jin¹, Sungyoon Jang^{2,*}, Myeong Seong Lee¹

¹Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

²Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

*Corresponding author : fkite@korea.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 5 October 2021

Received in revised form 4 November 2021

Manuscript accepted 6 November 2021

Available online 28 December 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.6.671>

Research Highlights

- Thermal deformation of roof tiles is observed in the ancient tombs of Seokchon-dong.
- Deformed roof tiles have experienced the temperature of 1,000°C to 1,200°C, showing uneven colors, sandwich structures, and bloating pores.
- It is presumed that thermal deformation of roof tiles was caused by cremation rituals at the tombs of Seokchon-dong in the Baekje period.

ABSTRACT

This study investigated the firing temperature and thermal deformation process of roof tiles excavated from the connected stone-mound tomb in Seokchon-dong, Seoul, based on mineralogical and physical properties. A large number of roof tiles were excavated from the tomb site and some roof tiles were deformed by heat and were fired in uneven conditions. The colors of original roof tiles and their cores are mostly yellowish-brown, with high water absorption over 12%, containing fine-grained textures and some minerals such as quartz, feldspars, amphibole, and mica. It is estimated that the original roof tiles were fired below 900°C in oxidation condition, showing loose matrices and mica layers by scanning electron microscopy. However, deformed roof tiles have the uneven surface color of reddish-brown and bluish-gray, and those cross-sections have sandwich structures in which dense reddish-brown surface and porous grey core coexist. They contained mullite and hercynite, so it was estimated to have been fired over 1,000°C, with 0.81~11% water absorption. In some samples, bloating pores by overfiring were observed, which means that they were fired at more than 1,200°C. In addition, the refiring experiments that the original roof tile was fired between 800°C and 1,200°C were carried out to investigate the physical and mineralogical properties of roof tiles compared to deformed ones. As a result, the water absorption decreased rapidly and the mineral phase started to change over 1,000°C. As the temperature gradually rises, the matrices are partially melted and recrystallized, resulting in similar thermal characteristics of deformed roof tiles. Therefore, the roof tiles from ancient tombs in Seokchon-dong seem to experience the secondary high temperature of 1,000 to 1,200°C under uneven firing conditions, resulting in deformation characteristics such as shape transformation and mineral phase transition. It is considered to have been related to cremation rituals at the tombs of Seokchon-dong during the Baekje period.

Keywords : ancient tombs in Seokchon-dong, roof tile, firing temperature, refiring experiment, thermal deformation

Citation: Jin, H.J., Jang, S., Lee, M.S. (2021) Interpretation of Firing Temperature and Thermal Deformation of Roof Tiles from Ancient Tombs of Seokchon-dong in Seoul, Korea. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.54, p.671-687, doi:10.9719/EEG2021.54.6.671.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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 original work is properly cited.

pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

서울 석촌동 고분군 출토 기와의 소성온도와 열변형 특성 해석

진홍주¹ · 장성윤^{2,*} · 이명성¹

¹국립문화재연구소 보존과학연구실

²국립문화재연구소 문화재보존과학센터

*책임저자 : fkite@korea.kr

요 약

이 연구에서는 서울 석촌동 고분군 연접적석총에서 출토된 기와의 물리적 및 광물학적 특성을 바탕으로 소성온도를 추정하고, 열변형 과정을 해석하였다. 석촌동 고분군에서는 다량의 기와가 출토되었는데, 일부 기와는 열에 의해 형태가 변하고 불균일한 소성상태를 나타냈다. 원형기와의 표면과 속심의 색조는 비교적 균일한 황갈색 계열로서 약 12% 이상의 높은 흡수율을 나타내며, 미정질 기질에 세립질 석영, 장석류, 운모, 각섬석 등을 포함한다. 또한 미세조직 관찰 결과, 느슨한 기질과 운모의 층상구조가 확인되어 900℃ 이하의 산화환경에서 제작되었을 것으로 추정된다. 반면 열에 변형된 기와는 주로 적갈색과 청회색의 불균일한 표면 색조를 보이며, 단면은 치밀한 적갈색 표면과 다공성의 자회색 내부기질이 함께 나타나는 샌드위치 구조를 나타낸다. 흡수율은 0.8~11%이며, 멀라이트, 헤르시나이트가 동정되어 소성온도가 1,000℃ 이상으로 추정된다. 일부 시료에서는 과소성에 의한 블로우팅 포어(bloating pore)가 관찰되었고, 1,200℃ 이상의 고온을 경험한 것으로 판단된다. 한편, 원형기와를 800~1,200℃ 사이에서 온도별로 재소성하여 물리적 및 광물학적 특성을 확인한 결과, 1,000℃ 부근에서 흡수율이 급격히 낮아지고 고온 광물이 생성되기 시작했다. 또한 점차 온도가 올라갈수록 기질이 부분 용융되고 재결정화되어 변형기와의 열변형 특성과 유사한 결과를 나타냈다. 따라서 석촌동 고분군 기와는 불균일한 소성상태와 1,000~1,200℃에 달하는 2차 고온을 경험하여 형태 변형, 광물 상전이 등의 열변형 특성이 발생하였고, 이는 백제시대 화장의례와 관계가 있는 것으로 생각된다.

주요어 : 석촌동 고분군, 기와, 소성온도, 재소성실험, 열변형

1. 서 언

서울 석촌동 고분군은 백제 한성기를 대표하는 왕릉으로 백제 초기 고분 양식과 고구려와의 계통성을 살펴볼 수 있는 중요한 유적이다. 2015년 땅 꺼짐 발생을 계기로 한성백제박물관에서 석촌동 고분군 1호분 북쪽 구역을 재조사하여, 개별 단위 적석묘가 서로 맞닿아 있는 대규모 연접적석총을 확인하였다. 연접적석총 내 매장의례부에서는 화장인골, 목탄, 소토, 고온으로 변형된 유리구슬과 기와, 금제이식 등이 출토되었다(Seoul Backje Museum, 2019).

연접적석총 매장의례부에서는 수키와, 암키와, 수막새 등 여러 종류의 기와가 확인되었다. 원래 기와는 건축부재로 사용되며, 고분에서 출토된 사례는 드문 편이다. 특히 출토된 기와 중 일부는 형태가 심하게 뒤틀리거나 변색되는 등 고온으로 기형이 변화된 상태이다. 기와 외에도 시공 시 기와 밑에 끼는 홍두깨흙과 껌쇠, 못 등 건축부재가 동반 출토되었으므로 발굴조사 기관에서는 제례의식을 위한 목조건축물이 있었고 그 위에 기와를 사용하였을 것으로 보고 있다(Seoul Backje Museum, 2020).

기와는 토양 채취, 수비, 성형, 건조, 소성작업 순서로 제작되는 건축재료로서 소성온도에 따라 물리적 및 광물학적 변화를 수반한다. 그러나 기와의 소성단계에서 과도한 열이 일정시간 가해지면 기와의 형태와 색이 변하는 경우가 발생하는데 이러한 기와를 ‘과소성품’이나 ‘소성불량품’으로 지칭한다. 이들은 가마터 혹은 화재가 발생한 유적에서 주로 출토되며, 고분에서 출토된 사례는 드물다(Sinopoli, 1991; Lee and Kim, 2012; Han *et al.*, 2019; Seoul Backje Museum, 2020).

따라서 이 연구에서는 서울 석촌동 고분군 연접적석총 내 1호 매장의례부에서 출토된 기와 중 원형의 기와와 열변형 기와의 물리적 및 광물학적 분석을 통해 소성온도를 추정하였다. 특히 원형기와에 열을 가해 광물학적 변화 양상을 조사하는 재소성실험을 통해 변형기와의 특성과 변형과정을 검토하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구유적

서울 송파구 일대는 석촌동 고분군을 비롯한 풍납토성,

Fig. 1. Location map of ancient tombs of Seokchon-dong in Seoul, Korea(modified Naver Map; Seoul Baekje Museum, 2019), (A) Location of historic sites around Seokchon-dong during Baekje period, (B) Distribution of ancient tombs of Seokchon-dong, (C) Connected stone-mound tomb, (D) Magnification of the box area at (C).

몽촌토성, 방이동 및 가락동 고분군 등 백제 왕성과 왕릉이 분포한다(Fig. 1A). 석촌동 고분군은 일제강점기 고적조사사업과 1970년대, 1980년대 잠실지구 개발사업으로 조사되었다. 일제강점기까지 수백기의 고분이 남아있었으며, 적석총, 증석봉토분, 토광묘, 옹관묘 등 다양한 묘제가 공존한다(Seoul Baekje Museum, 2019). 석촌동 고분군 유구는 1~5호분, A호 적석총 등이 대표적이다(Fig. 1B). 2015년 땅 꺼짐 현상이 1호분과 2호분 사이에서 발생하여 함몰부에 대한 시굴조사를 시작하였으며, 이후 지속적인 발굴조사로 1호분과 A호 적석총 북쪽에 위치한 남북길이가 100m 이상인 대규모 연접적석총을 확인하였다. 연접적석총은 1호분, A호 적석총과 연접하여 ‘1호분 북쪽 연접적석총’(이하 연접적석총)으로 명명되며, 연접된 범위는 더 넓을 가능성이 있다(Seoul Baekje Museum, 2019).

연접적석총은 적석묘, 연접부, 매장의례부로 구분되는데, 소형 및 중형의 개별단위 적석묘가 연접부로 연결되고 적석묘 동편 기단 외곽에 매장의례부가 연접된 구조이다. 연접적석총 내 개별단위 적석묘는 총 13기가 분포하는데, 가장 먼저 축조된 1호 적석묘가 연접의 기점으로 남쪽에 분포한 1호분까지 연결된 형태이다(Fig. 1C). 매장의례부는 매장과 관련된 의례가 행해진 부속시설로 적석묘의 동편에 분포하며 1호, 4호, 7호 적석묘에서 확인된다. 화장된 인골, 동물뼈, 토기, 기와, 유리구슬, 금제이식 등 다양한 종류의 유물이 매장의례부에서 출토되어 백제 매장문화를 살펴볼 수 있다(Seoul Baekje Museum, 2019). 특히 1호 적석묘의 동쪽 기단 남측에 위치한 1호

매장의례부에서 가장 많은 유물이 출토되었다(Fig. 1D).

2.2. 연구대상

서울 석촌동 고분군 연접적석총에서 1만점이 넘는 많은 기와가 파편으로 출토되었으며, 1호 매장의례부에서 출토된 비율이 가장 높은 편이다. 출토 기와의 약 5%는 2차적인 고온에 의해 변형된 개체로 확인되었다(Seoul Baekje Museum, 2019). 연구대상은 연접적석총 1호 매장 의례부에서 출토된 수키와, 암키와 편으로 타날문양 속성에 따라 무문, 격자문, 선문으로 형식을 분류하였다. 기와의 색과 형태를 고려하여 원형을 유지하는 평기와 17점을 원형기와(Original roof tiles) 그룹으로 선정하였다. 그리고 동일한 형식 분류 내에서 고온에 형태가 변형되고 육안상 불균일한 산화상태를 나타내는 기와 12점을 변형기와(Deformed roof tiles) 그룹으로 분류하였다.

연구대상 기와는 외면에 타날문과 내면에 포목흔, 측면에 와도흔 등 여러 제작특성이 관찰된다. 먼저 수키와와 암키와로 구분하고 세부적으로 무문, 격자문, 선문 등의 타날문양별로 정리하였다. 육안관찰을 통해 황갈색, 등황색, 적갈색, 회색, 청회색, 자회색, 흑색으로 분류하고 기와 표면의 대표 색상을 Table 1에 표기하였다. 원형기와 그룹은 전반적으로 등황색 및 황갈색의 표면 색조를 보여 산화환경에서 제작되었을 것으로 생각된다. 기벽 두께는 10mm 내외로 일정하며 대체로 연질의 소성도를 나타낸다.

한편 변형기와 그룹은 대체로 등황색 내지 적갈색, 청회색 색조가 불균일하게 나타내며, 경질의 소성도를 보

Table 1. Details of the roof tiles

Group	Sample	Type	Surface pattern	Thickness	Surface color ¹	
					Outer	Inner
Original roof tiles	#01	convex	patternless	9mm	G	G
	#02	convex	patternless	9mm	YB	YB
	#03	convex	patternless	8mm	YR	YR
	#07	convex	lattice	8mm	YB	YB
	#08	convex	lattice	7mm	YB	YB
	#09	convex	lattice	10mm	YR	YR
	#12	convex	line	10mm	G	G
	#13	convex	line	9mm	G	G
	#15	concave	patternless	12mm	YR	YR
	#17	concave	patternless	9mm	YR	YR
	#18	concave	patternless	11mm	YR	YR
	#19	concave	lattice	8mm	G	G
	#20	concave	lattice	11mm	YB	YB
	#21	concave	lattice	11mm	YR	YR
	#26	concave	lattice	8mm	YB	YB
	#27	concave	lattice	8mm	B	B
	#28	concave	line	12mm	YR	YR
Deformed roof tiles	#04	convex	patternless	9mm	BG	RB
	#05	convex	patternless	14mm	RB/BG	RB
	#06	convex	patternless	9mm	RB/BG	RB/BG
	#10	convex	lattice	8mm	YR	YR
	#11	convex	lattice	12mm	RB	YR
	#14	convex	line	8mm	BG	RB
	#16	concave	patternless	13mm	YR	RB
	#22	concave	lattice	13mm	RB	YR
	#23	concave	lattice	12mm	YR/BG/RB	YR/BG/RB
	#24	concave	lattice	16mm	BG/RB	BG/RB
	#25	concave	lattice	12mm	BG	BG
	#29	concave	line	12mm	YR/RB	YR/RB

¹YB; yellowish brown, YR; yellowish red, RB; reddish brown, G; gray, BG; bluish gray, PG; purplish gray, B; black.

인다. 변형기와는 단일 색상을 보이는 원형기와 시료와 달리 산화 및 환원의 불균일한 색조가 관찰되는데, 이는 기와가 제작된 후 이차적으로 고온을 경험한 결과로 보인다. 따라서 변형기와는 동일시료 내에서도 색과 질감이 다른 경우가 있어 각 지점별로 분석을 진행하였다(Fig. 2).

변형기와는 여러 양상으로 고온에 의한 변형이 관찰되는데, 표면이 거칠고 불균일한 산화흔을 보이는 시료(#04, #11), 공기가 빠져나간 미세한 기공이 많이 관찰되는 시료(#05, #16), 치밀한 기벽 특성을 갖는 시료(#23), 기벽이 팽창한 시료(#24) 등으로 구분되며, 제작 후 고온을 경험하면서 광물학적 변화를 겪은 것으로 생각된다. #24, #25 시료는 기와 표면에 소토가 융착되었는데, 이는 점토로 기와를 시공한 상태에서 열을 받아 굳어진 결과로

보인다. #23 시료는 색조와 소성도가 다르게 나타나 각 부분별로 구분하여 분석을 진행하였다.

2.3. 연구방법

이 연구에서는 석촌동 고분군에서 출토된 기와 29점을 원형기와와 변형기와로 분류하여 물리적, 광물학적 및 미세조직 특성을 비교하였다. 물리적 특성으로 기와의 색도, 흡수율과 비중을 측정하였다. 분광측색계(CM-600d, Konica minolta, JP)를 활용하여 대표적인 색상을 명도(L^*)와 채도(a^* , b^*)로 수치화하였다. 흡수율과 비중은 KSL4008에 근거하여 비중측정용 저울로 측정하여 산출하였다.

기와 태토의 주요광물은 X-선 회절분석(Empyrean, Panalytical, NL)으로 동정하였다. 측정은 40kV, 40mA 조

Fig. 2. Roof tile samples excavated from ancient tombs of Seokchon-dong site, showing various textures and colors affected by firing temperature and condition. Samples are divided by original and deformed roof tiles and chosen by their shapes and colors.

건에서 5~65°범위를 0.02°/sec 간격으로 스캔하여 실시하였다. 또한 전암대자율은 시료의 굴곡이 적은 기와 외면을 휴대용 대자율 측정기(SM-30, ZH Instruments, CZ)로 10회씩 측정하였다.

기와 표면과 단면의 미세조직 특성을 조사하기 위해 분석시료를 에폭시수지로 고정하고 박편을 제작하였으며, DVM6 저배율 렌즈가 장착된 실체현미경(DM 2500M, Leica, JP)과 편광현미경(ECLIPSE LV100NPOL, Nikon, JP)으로 관찰하였다. 또한 기질의 미세조직은 파단면을 탄소 코팅하여 주사전자현미경(JSM IT-300, Jeol, JP)으로 동일 배율(x1,000)에서 이차전자이미지(SEI)를 관찰하였다. 기와 태토의 주성분원소는 파장분산형 X-선 형광분석기(Zetium, Panalytical, NL)로 정량분석하였다. 분석은 105℃에서 건조된 시료를 분쇄하여 용제(Lithium Tetraborate with Lithium Bromide)로 유리비드를 제작하여 실시하였다.

또한 비교적 소성도가 낮은 #03 시료를 대상으로 열변형 과정을 추적하고자 재소성실험을 실시하였다. 재소성은 전기로(LH 30/14, Nabertherm, DE)를 이용하여 산화염 방식으로 진행하였으며, 조건은 800~1,200℃의 온도 범위에서 50℃ 간격의 9단계로 설정하였다. 각 소성 단계에 따라 5℃/min 승온하여 목표온도에 도달시킨 후 최고온도에서 3시간을 유지하였다. 소성조건은 선행연구에서 제시된 연구방법을 사용하였다(Whitbread, 1995; Jang

and Lee, 2014). 재소성 시편은 석촌동 고분군 출토 기와와 동일한 분석조건으로 색도분석, 흡수율 측정, X-선 회절분석과 주사전자현미경 관찰을 실시하여 소성온도 변화에 따른 구성광물의 조성과 태토 조직의 변화 양상을 살펴보고자 한다.

3. 연구결과

3.1. 물리적 특성

색도, 흡수율 등의 물리적 특성은 태토의 광물 및 화학 조성, 기와의 소성분위기 및 소성온도 등을 간접적으로 반영한다. 석촌동 고분군 원형기와 그룹은 형식(수키와, 암키와)이나 타날유형과 관계없이 황색도(+b*)와 적색도(+a*) 영역에 넓게 분포하며, 대체로 50 이상 영역에 명도(L*)가 도시된다(Table 2). 변형기와 그룹은 명도가 비교적 낮고, 적갈색계열과 청회색계열로 구분되는데(Fig. 3A), 이는 소성환경이 일정하지 않았음을 나타낸다.

한편 비중과 흡수율은 소성온도가 높을수록 흡수율이 낮아지고 비중이 높아지는 반비례 경향을 보인다. 원형기와 그룹의 부피비중과 흡수율은 각각 1.67~2.01, 7.85~20.80% 영역에 분포한다(Fig. 3B). 변형기와 그룹은 대체로 1.04~2.35, 0.80~11.01%의 비중과 흡수율을 보여 원형기와 그룹과 물성 차이가 확연히 나타난다. 상당히 낮은 비중(1.5 이하)을 보이는 시료는 주로 단면이 다공

Table 2. Physical and Mineralogical properties for roof tiles

Group	Sample	Chromaticity			Specific gravity	Water absorption (%)	Magnetic susceptibility ¹	Minerals ²
		L*	a*	b*				
Original roof tiles	#01	39.73	0.59	4.31	1.94	10.32	2.79	Q, K, P, Mu, Her
	#02	56.36	4.46	16.14	1.75	16.57	2.79	Q, K, P, M
	#03	63.95	14.31	27.90	1.74	16.73	2.27	Q, K, P, M, Am
	#07	55.74	8.02	21.83	1.78	14.57	0.94	Q, K, P, M
	#08	60.59	4.13	15.85	1.80	14.00	0.52	Q, K, P, M
	#09	58.52	20.24	29.83	1.73	16.97	3.21	Q, K, P
	#12	49.99	3.57	14.28	1.87	12.24	1.66	Q, K, P
	#13	61.97	0.65	8.29	1.82	13.68	0.27	Q, K, P, M
	#15	58.38	12.97	26.79	1.81	15.91	7.86	Q, K, P, Mu, Her
	#17	54.46	23.84	36.25	1.67	20.80	7.65	Q, K, P, M
	#18	51.30	10.26	20.23	1.83	15.27	1.12	Q, K, P, M
	#19	58.05	1.46	11.26	1.74	16.89	0.98	Q, K, P, Am
	#20	61.98	4.96	18.88	1.82	14.30	3.89	Q, K, P, M
	#21	53.02	19.69	29.03	1.73	18.36	10.76	Q, K, P, Am
	#26	61.25	4.58	16.50	1.80	15.12	0.87	Q, K, P, M, Am
	#27	37.92	2.10	6.79	1.82	14.06	2.07	Q, K, P, M
	#28	53.85	20.16	25.48	2.01	7.85	7.28	Q, K, P, Mu, Her, T
Deformed roof tiles	#04	40.38	-0.79	3.05	2.34	0.80	1.40	Q, Mu, Her
	#05-1	51.41	11.30	18.48	1.37	6.99	0.44	Core: Q, P, Mu, Her
	#05-2	39.14	3.16	9.54	1.37	6.99		Surface: Q, P, Mu, Her, H
	#06	47.72	15.12	19.95	2.06	4.81	1.58	Core: Q, P, Mu, Her, T
	#06	47.72	15.12	19.95	2.06	4.81		Surface: Q, P, Mu, Her, T, H
	#10	53.26	15.40	22.71	1.97	8.67	0.65	Q, K, P, Mu
	#11-1	44.71	7.04	12.16	2.04	7.82	0.87	Q, K, P, Mu, Her
	#11-2	42.59	4.68	9.56	1.90	1.73		Q, K, P, Mu, Her
	#14	42.72	0.27	5.48	2.35	0.87	0.70	Q, P, Mu, Her
	#16-1	51.80	15.43	25.52	1.23	8.93	0.58	Q, K, P, Mu, Her
	#16-2	45.15	3.77	11.57	1.23	8.93		
	#22	45.91	18.77	22.54	1.98	11.01	6.46	Q, K, Her
	#23-1	53.17	20.04	29.19	1.78	16.38	1.78	Q, K, P, M, Am
	#23-2	36.53	0.70	6.00	-	-		-
	#23-3	36.29	2.28	7.96	2.25	2.42	0.31	Q, K, Mu, Her, H
	#24-1	40.96	-1.10	3.71	1.04	9.22		Q, K, P, Mu, Her
	#24-2	38.07	5.80	9.20	1.04	9.22		
	#25	46.96	0.61	7.56	1.33	10.89	0.68	Q, K, P, Mu, Her
	#29-1	53.73	18.29	25.99	2.01	7.24	1.16	Q, K, P, Mu, Her
	#29-2	38.19	3.38	7.94	1.40	7.41		Q, K, P, Mu, Her

¹Average magnetic susceptibility($\times 10^{-3}$ SI unit).²Abbreviations: Q; quartz, K; K-feldspar, P; plagioclase, M; mica, Am; amphibole, Mu; mullite, Her; hercynite, H; hematite, T; tridymite.

성의 자회색 기질로 관찰되는데 과도한 소성에 기인한 결과로 생각된다.

특히 변형기와 중 #23 시료는 동일 시편 내에서 색과 소성도가 다른 부분이 나타나 각 부분별로 흡수율을 측정하였다. 등황색 연질부분(#23-1)은 16.38%, 적갈색 피

막이 형성된 부분(#23-3)은 2.42%로 동일 시료 내에서도 확연한 물성 차이를 나타낸다. 이는 기와가 불균일한 열을 경험한 것으로 판단되며, 물성 특성을 변화시킬 정도의 높은 열이 이차적으로 가해진 것으로 생각된다.

Fig. 3. Diagram of physical properties for roof tiles. (A) chromaticity, (B) water absorption and specific gravity.

3.2. 광물학적 특성

전암대자율은 암석 내 자화광물의 세기를 측정하는 방법으로 석조문화재 연구에 주로 활용되며, 암석의 풍화 산물로 제작되는 토기, 기와 등의 연구에도 적용된다(Jo *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2016). 기와 외면을 대상으로 10회씩 대자율을 측정한 결과, 원형기와는 $0.24 \sim 11.10 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 넓은 대자율 분포를 보이고, 특히 암키와의 무문과 격자문 타날 속성이 비교적 넓게 분포하여 동일 그룹 내에서도 광물학적 차이를 반영할 것으로 추정된다(Fig. 4). 변형기와에서도 격자문 암키와는 비교적 높은 값을 나타내나 다른 그룹은 대자율 값이 $2 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이하에 밀집하여 분포한다.

한편 X-선 회절분석을 실시하여 기와 태토의 구성광물을 확인하였다. 원형기와 태토는 대체로 석영(quartz), K-장석(K-feldspar), 사장석(plagioclase), 운모(mica)가 주구성광물로 확인되며 일부는 각섬석(amphibole)을 포함한다(Table 2, Fig. 5). 운모는 $900 \sim 1,000^\circ\text{C}$ 에서 상전이되어 회절선이 소멸되므로, 운모를 포함하는 기와는 900°C 이하에서 소성되었을 것으로 판단된다. 그러나 일부 시료(#01, #15, #28)에서는 멀라이트(mullite), 헤르시나이트(hercynite) 피크가 검출되어 기와 제작 시 $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 소성환경도 조성되었을 것으로 보인다.

변형기와의 주구성광물은 석영, 장석류와 함께 고온생

Fig. 4. Diagrams of the magnetic susceptibility for roof tiles.

성광물인 멀라이트와 헤르시나이트도 동정된다. 멀라이트와 헤르시나이트의 회절세기가 상대적으로 차이를 보여 변형기와 내에서도 소성온도가 다소 다를 것으로 보인다. 원형기와에서 검출된 운모 혹은 각섬석 회절선이 소멸되어, 고온광물이 생성되는 최소 $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 높은 온도를 경험한 것으로 생각된다. 또한 시료 #05, #06과 같이 표면에 적갈색 층을 보이는 시료는 적철석(hematite)

Fig. 5. Representative X-ray diffraction patterns of roof tiles. Abbreviations: Q; quartz, K; K-feldspar, P; plagioclase, M; mica, Am; amphibole, Mu; mullite, Her; hercynite, H; hematite, T; tridymite.

이 검출되어 산화환경에서 고온의 열을 경험한 것으로 판단된다(Table 2).

한편 #23 시료는 동일 기와 내에서도 연질의 등황색(#23-1)과 경질의 적갈색(#23-3)으로 구분되는데, #23-1은 석영, 장석류, 운모, 각섬석, #23-3은 석영, K-장석, 멀라이트, 헤르시나이트, 적철석으로 태토의 주구성광물이 다르게 나타난다. 앞서 흡수율에서도 각각 16.38%와 2.42%로 차이를 나타내는데, 이는 기존에 연질 소성된 기와가 불균일하게 2차적 고온을 경험하여 나타난 현상으로 생각되며, 2차 고온은 구성광물의 상전이를 일으키고 물리적 특성을 변화시킬 수 있을 정도의 온도와 유지시간이 있었을 것으로 생각된다.

3.3. 조직 특성

기와의 표면 및 단면 조직은 제작기법, 소성도, 소성환경 등 다양한 정보를 나타낸다. 실체현미경과 편광현미경으로 기와의 태토 내 광물 입자 크기와 함량, 기질 내 공극 등 대표적인 조직 특성을 관찰하고 주사전자현미경으로 미세조직을 확인하였다.

원형기와는 대체로 황갈색과 등황색 표면 색상을 보이며, 외면 타날문과 내면 포흔 등 제작특성을 제외하고는 특이점은 관찰되지 않는다. 단면 색조는 표면(외면과 내면)과 속심이 구분되지 않을 정도로 상당히 유사하다(Fig. 6). 대체로 황색계열의 비교적 단일색상을 보여 산화분위기에서 기와가 소성되었을 것으로 보인다. 그러나

원형기와 #26 시료의 표면은 황갈색, 속심은 흑색에 가까운 색상을 보여 표면과 속심의 색이 다른 샌드위치 구조로 확인되며, 회색계열의 색상을 보이는 시료(#01, #12, #13, #19, #27)도 있어 일부 환원분위기 조성되었을 것으로 생각된다.

변형기와는 대체로 표면과 속심의 색이 다르게 나타나는데, 표면은 적갈색이고 속심은 청회색 또는 자회색인 샌드위치 구조(sandwich structure)로 확인된다. 단일색상인 시료는 소성과정 동안 유사한 산화 또는 환원 분위기가 지속적으로 조성되었을 것으로 추정되나, 샌드위치 구조는 소성과정에서 속심과 표면의 소성환경이 달랐을 것으로 생각된다. 특히 내부의 검은 속심과 외부의 적색 표면은 철의 산화상태와 깊은 관계가 있다고 알려져 있다(Nodari *et al.*, 2004).

편광현미경 관찰 결과, 원형기와는 미정질 기질에 500μm 내외의 석영 및 장석과 미세립 광물을 다수 포함한다. 철 산화물이 부분적으로 분포하며, 치밀한 기질 내에 세립질 석영 입자를 포함한다. #26과 #27 시료는 중립질 석영입자도 포함하고 가는 기공(planar voids)을 소량 포함하여 특징적이다.

변형기와는 원형기와에서 관찰되지 않는 다양한 표면 특성이 나타난다. 높은 온도에서 형성된 자연유가 비산되어 나타난 거친 표면, 균열과 터짐 현상, 표면 유리질화로 치밀한 기질과 광택 발생, 흑색 혹은 적갈색의 돌출된 미세기공 등이 확인된다. 특히 대부분의 단면은 속

Fig. 6. Representative photomicrographs of roof tiles using the stereoscopic and polarizing microscope.

Table 3. Microstructure characteristics of roof tiles

Group	Sample	Structure ¹	Color ²		Voids ³	Vitrification ⁴
			Core	Margin		
Original roof tiles	#01	single	G	G	channels	EV
	#02	single	YB	YB	vughs	NV
	#03	single	YR	YR	vughs	NV
	#07	single	YB	YB	vughs	NV
	#08	single	YB	YB	vughs	NV
	#09	single	YR	YR	vughs	-
	#12	single	G	G	channels	EV
	#13	single	G	G	vughs	IV
	#15	sandwich	G	YR	vughs	IV
	#17	single	YR	YR	vughs	NV
	#18	single	YR	YR	vughs	NV
	#19	single	G	G	channels	NV
	#20	single	YB	YB	vughs	NV
	#21	single	YR	YR	vughs	IV
	#26	sandwich	B	YB	planar	NV
	#27	single	B	B	planar	NV
	#28	sandwich	BG	YR	vughs	EV
Deformed roof tiles	#04	sandwich	BG	RB	channels	CV
	#05	sandwich	PG	RB	vesicles	CV
	#06	sandwich	PG	RB	vesicles	CV
	#10	single	YR	YR	channels	-
	#11-1	sandwich	BG	YR	channels	CV
	#11-2	sandwich	PG	BG	vughs	
	#14	sandwich	RB - BG		channels	CV
	#16	sandwich	PG	RB	vesicles	CV
	#22	sandwich	BG	YR	channels	EV
	#23-1	single	YR	YR	channels	-
	#23-3	sandwich	RB	BG	-	EV
	#24	sandwich	PG	BG	vesicles	CV
	#25	sandwich	PG - BG		vesicles	CV
	#29-1	sandwich	YR - BG		channels	EV
	#29-2	sandwich	PG	BG	vesicles	

¹Single; cross section shows similar color between core and margin, sandwich; cross section shows different color between core and margin.

²YB; yellowish brown; YR; yellowish red, RB; reddish brown, G; gray, BG; bluish gray, PG; purplish gray, B; black.

³Polarizing microscope observation for thin section(Quinn, 2013).

⁴NV; no vitrification, IV; initial vitrification, EV; extensive vitrification, CV; continuous vitrification(by SEM observation, Maniatis and Tite, 1981).

심과 표면 색상이 다른 샌드위치 구조를 보여 소성분위기가 일정하지 않았음을 알 수 있다(Table 3). 단면은 청회색 혹은 적갈색의 기질 색상이 공존하는 시료와 적갈색 표면에 자회색 속심을 보이는 시료가 대표적이다. 편광현미경 관찰에서 자회색 속심은 일부 광물이 변질되어 기질과 경계가 불분명하며, 투광도가 낮아 광물편이 거의 관찰되지 않는다. 고온에서 기질의 부분 용융과 재결정이 진행되면서 큰 기공이 다량 생성되는 블로우팅 포

어(bloating pore) 현상도 확인된다(Fig. 6).

주사전자현미경의 동일 배율($\times 1,000$)로 기와 공극의 형태와 분포, 광물과 기질의 변질 정도, 유리질화 정도를 조사하였다(Fig. 7). 기질의 유리질화 정도는 선행연구를 참고하여 유리질화가 보이지 않는 상태(NV; no vitrification), 초기 유리질화 상태(IV; initial vitrification), 유리질화가 진행된 상태(EV; extensive vitrification), 완전한 유리질화 상태(CV; continuous vitrification)의 4단계로 구분하였다

Fig. 7. Scanning electron microscopic images of roof tiles with mineral contents.

(Maniatis and Tite, 1981; Chatfield, 2010). 원형기와에서는 대체로 기질의 유리질화가 관찰되지 않고(NV), 느슨한 기질에 충상구조가 명확한 운모와 광물입자들이 관찰된다. X-선 회절분석에서 운모가 확인되지 않은 시료는 초기 유리질화 상태(IV)로 확인된다. 변형기와는 기질과 광물이 부분 용융되고 재결정화되어 상당히 치밀해졌으며, 공극이 길쭉한 형태(channels), 무정형(vughs), 원형(vesicles)이 나타나고 공극 크기도 다양하다(Quinn, 2013). 단면 관찰시 자회색 기질을 보인 시료는 원형공극을 다수 포함하여 특징적이다.

3.4. 지구화학적 특성

기와 태토의 동질성을 살펴보고자 주성분원소 함량을 살펴보았다(Table 4). 원형기와 그룹은 SiO_2 59.59~68.00

wt.%, Al_2O_3 16.24~20.56 wt.%, Fe_2O_3 3.90~10.11 wt.%의 함량을 나타낸다. 변형기와는 SiO_2 60.20~68.49 wt.%, Al_2O_3 16.96~22.00 wt.%, Fe_2O_3 3.93~10.14 wt.%로 유사한 범위에 분포한다.

한편 기와의 주성분원소를 그래프에 도시한 결과(Fig. 8), 기와의 선문타날 형식은 기와 종류 및 소성도와 무관하게 상당히 유사한 영역에 분포한다. 다만 격자타날문 기와는 비교적 넓은 원소분포 영역을 보이는데 #07, #08, #09, #10, #25, #26, #27 시료가 상당히 유사한 영역으로 나타나 장식류 광물이 다수 확인된 광물학적 특징과 동일하다. 이는 격자타날문 내에서도 태토의 정선도가 다소 차이를 보이는 것으로 확인된다.

원형기와와 변형기와는 주성분원소의 분포가 동일하며, 재료적 특성으로는 구분되지 않는다. 이로 볼 때 동일한

Fig. 8. Distribution diagrams showing $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ of the roof tiles.

Table 4. Major elements composition of roof tiles(wt.%)

Group	Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
Original roof tiles	#01	65.65	17.91	7.65	0.05	1.32	0.63	0.74	2.08	0.89	0.20	2.52	99.63
	#02	61.89	19.99	5.58	0.00	1.14	0.43	0.90	2.28	0.96	0.36	6.06	99.58
	#03	62.03	20.56	6.28	0.04	1.19	0.63	0.80	2.31	1.02	0.51	4.37	99.74
	#07	66.15	16.84	3.90	0.02	0.67	0.40	1.07	3.47	0.81	0.31	5.94	99.57
	#08	65.12	16.84	3.96	0.00	0.68	0.40	1.12	3.45	0.81	0.33	6.91	99.62
	#09	68.00	17.66	4.31	0.02	0.87	0.41	1.17	3.46	0.95	0.10	2.51	99.48
	#12	66.48	18.38	7.44	0.05	1.24	0.57	0.73	2.17	0.89	0.15	0.84	98.94
	#13	64.04	19.22	5.62	0.04	1.25	0.67	1.05	2.31	0.91	0.91	2.95	98.96
	#15	59.59	20.11	9.91	0.10	2.06	1.06	0.69	1.73	1.10	0.34	2.73	99.42
	#17	64.84	17.76	7.46	0.06	1.34	0.38	0.83	2.44	0.92	0.18	2.96	99.17
	#18	62.70	17.81	6.87	0.04	1.17	0.34	0.87	2.51	0.88	0.37	5.64	99.18
	#19	64.49	20.08	6.35	0.00	1.24	0.51	0.93	2.38	0.93	0.19	1.83	98.93
	#20	61.96	19.52	5.57	0.05	0.93	0.57	1.08	2.16	0.88	0.25	6.05	99.00
	#21	59.60	19.58	10.11	0.12	2.13	0.96	0.70	1.75	1.17	0.18	2.66	98.95
	#26	64.94	16.83	4.16	0.00	0.90	0.48	0.89	2.25	0.83	0.68	6.91	98.86
	#27	64.63	16.24	4.48	0.00	0.89	0.45	0.73	2.09	0.86	0.30	8.27	98.95
	#28	65.26	19.39	7.18	0.03	1.14	0.45	1.03	2.27	0.95	0.21	1.17	99.08
Deformed roof tiles	#04	63.61	21.43	6.43	0.03	1.35	0.50	0.80	2.44	1.00	0.14	2.13	99.86
	#05	65.33	19.80	6.30	0.03	1.26	0.67	1.07	2.34	0.97	0.15	1.76	99.69
	#06	61.06	20.39	10.14	0.11	2.08	1.03	0.61	1.80	1.18	0.16	1.07	99.64
	#10	68.49	16.96	4.18	0.02	0.84	0.38	1.11	3.58	0.86	0.08	2.31	98.79
	#11	65.27	19.89	6.55	0.03	1.30	0.58	1.12	2.36	0.95	0.23	0.68	98.94
	#14	64.87	19.85	6.49	0.00	1.29	0.60	1.05	2.31	0.97	0.16	1.55	99.13
	#16	64.91	19.64	6.84	0.03	1.29	0.64	1.01	2.33	0.94	0.22	1.61	99.46
	#22	60.20	22.00	9.32	0.04	1.52	0.46	0.43	2.10	0.97	0.23	1.68	98.94
	#23	65.53	18.97	6.67	0.00	1.46	0.53	0.70	2.36	0.93	0.21	1.51	98.84
	#24	65.27	19.19	6.38	0.05	1.32	0.66	1.21	2.45	0.90	0.14	1.42	98.98
	#25	68.19	17.09	3.93	0.03	0.91	0.41	1.10	3.47	0.75	0.03	2.62	98.51
	#29	65.18	19.08	6.32	0.04	1.22	0.66	1.01	2.42	0.93	0.17	1.72	98.73

재료를 사용하여 제작된 기와들이 고분축조 당시 공급되었으나 일부 기와는 이차적인 고온에 의해 형태가 달라진 것으로 판단된다. 다만 격자타날문 기와는 전암대자울에서도 비교적 넓은 분포범위를 보였는데 주성분원소 분포도 넓게 나타났다.

4. 고 찰

4.1. 석촌동 고분군 기와의 소성 특성

석촌동 고분군 연접적석층 매장지레부에서 출토된 화장인골, 불 맞은 구슬, 기와 및 소토는 백제 화장문화 연구에 있어 중요한 자료이다. 특히 기와의 일부는 고온을 경험하여 형태가 변화하였으며, 기와에 부착된 토양이 단단하게 소성된 상태로 발견된 사례도 있어 기와가 시공

된 상태에서 높은 열이 가해졌을 것으로 추정된다(Seoul Backje Museum, 2020). 따라서 형태가 변화된 기와에 대한 물리적, 광물학적 특성을 정리하여 이차적으로 경험한 소성온도와 소성분위기를 추정하고자 한다.

원형기와는 황갈색 또는 등황색을 보이고 단면도 이와 유사한 색조를 나타낸다. 기질 사이에 세립질 광물이 소량 분포하며 광물분포는 시료마다 다소 차이를 보인다. 대체로 원형기와는 석영, 장석류, 운모, 각섬석을 포함하는 광물조성과 전자현미경 상에서 느슨한 기질에 운모의 층상구조가 명확히 관찰되어 900℃ 이하에서 소성된 것으로 보인다. 다만 일부 시료(#01, #15, #28)에서는 고온 생성 광물이 동정되기도 하였다.

변형기와 그룹으로 선별된 기와는 고온으로 인한 다양한 열변형 특성이 관찰된다. #23 시료는 육안관찰과 광

물조성상 동일 기와 내에서 저온소성 부분과 고온소성 부분으로 구분되었다. 이 결과는 원형기와가 2차적 고온에 의해 열변형된 것을 의미한다. 대부분의 변형기와는 명도가 낮은 적갈색 혹은 청회색의 표면 색조를 보이거나 전반적으로 색상이 균일하지 않다. 흡수율은 11% 이하로 낮은 반면 비중은 높은 영역과 낮은 영역이 공존하는데, 비중이 낮은 경우는 기공의 재결정화에 의한 블로우팅(bloating)이 일어났기 때문으로 생각된다.

육안관찰된 기와의 형태 변형 특성은 다음과 같다. 기벽 두께를 유지하며 치밀한 청회색과 적갈색 기질이 공존하는 시료(#04, #11-1, #14, #22, #23-2, #29-1)와 분급도가 낮은 기공(bloating pore)을 상당수 포함하는 자회색 기질의 기벽이 팽창한 시료(#05, #11-2, #16, #24, #29-2)로 구별된다. 일부 시료의 표면은 광물이 부분용융되어 기와 표면에 돌출된 미세기공과 유약이 비산한 거친 표면이 관찰되는데, 이는 급속한 온도상승과 고온에 노출된 경우 발생할 가능성이 높다(Choi, 2001).

특히 #24는 기벽이 팽창하고 표면에 막이 형성된 상태이다(Fig. 9A). 단면은 분급도가 낮은 공극을 다수 포함하는 자회색의 다공질 기질로 블로우팅(bloating)이 발생하였다. 블로우팅 현상은 고온에 노출된 세라믹 재료에서 관찰되는 특징으로 소성온도 상승에 따라 표면에 치밀한 막이 형성되고 내부의 광물과 불순물이 용융되면서 생성된 가스가 빠져나가지 못하다가 기벽이 팽창하면서

발생한다(Han *et al.*, 1998; Kim, 2012). 기벽 팽창으로 #24는 기와 제작 흔적을 따라 균열까지 발생한 상태이다(Fig. 9B). 단면 관찰시 표면은 공극이 없는 치밀한 기질을 보이고, 속심은 다공성 유리질 기질을 형성한다(Fig. 9C, 9D).

한편 변형기와의 평균 흡수율은 6.34%로 원형기와(평균 14.92%)보다 낮게 나타났다. 또한 운모가 동정된 원형기와와 달리 멀라이트, 헤르시나이트와 같은 고온생성 광물이 동정되어 최소 1,000℃ 이상에서 소성되었을 가능성이 높다. 단면 관찰 결과, 바깥쪽에 치밀한 적갈색 층이 확인되고 내부는 청회색 또는 자회색으로 나타나는 샌드위치 구조를 보이는데, Fe의 산화상태에 따라 색이 다르게 나타났을 것으로 보인다. 따라서 변형기와는 제작과정 외에 이차적 고온이 가해졌으며, 이로 인해 물성, 색상, 광물조성 및 기질조직 등 여러 열변형 특성이 발생한 것으로 판단된다(Table 5).

4.2. 재소성실험을 통한 열변형 과정 검토

기와의 소성온도는 원형기와 700~900℃ 구간, 변형기와 1,000~1,200℃ 구간으로 추정된다. 그러나 변형기와는 다양한 열변형 특성이 확인되어 변형과정에 대한 보다 세밀한 검토가 요구된다. 이에 비교적 낮은 소성온도를 보인 원형기와 시료 #03을 산화염 전기가마에서 800~1,200℃ 범위, 50℃ 간격으로 재소성하여 소성온도별

Fig. 9. Thermal deformation of roof tile sample(#24) (A) swelling by bloating, (B) crack in the core, (C) glossy surface, and (D) cross section with vitrified textures and bloating pores.

Table 5. Thermal characteristics of the roof tiles.

	Original roof tiles	Deformed roof tiles
Surface color	yellowish brown, yellowish red	reddish brown, bluish gray
Cross section(color)	single	sandwich structure
Water absorption	mean: 14.92%	mean: 6.34%
Specific gravity	1.67~2.01	1.04~1.40 / 1.78~2.35
Mineral	quartz, feldspars, micas, amphibole, etc.	quartz, feldspars, mullite, hercynite, etc.
Vitrification structure	NV, IV	EV, CV
Firing atmosphere	oxidation / reduction	oxidation / reduction
Firing temperature	700~900℃	1,000~1,200℃

물성, 광물조성, 미세조직의 변화과정을 조사하였다(Fig. 10).

그 결과, 소성온도가 높아질수록 명도(L^*)는 점차 낮아졌고, 적색도(a^*)와 황색도(b^*)는 높아지다가 1,000~1,100℃ 구간부터 낮아지는 경향을 보인다(Table 6). 물성은 1,050℃를 기준으로 흡수율은 급격히 낮아지고, 비중은 높아지는 경향을 보여 1,000℃ 이상의 소성온도에서 물리적 특성이 명확하게 변화되었다.

X-선 회절분석 결과, 운모와 각섬석의 회절선이 각각 950℃, 1,000℃에서 50℃ 간격으로 순차적으로 소멸되는 것이 확인되었다(Fig. 11). 또한 멀라이트는 1,000℃부터 미약하게 생성되기 시작하면서 고온으로 갈수록 상대적인 회절강도가 높아지는 반면 석영과 장석류의 회절강도는 낮아지는 경향을 보인다. 따라서 소성온도 1,000℃ 부근에서 열변형 특성이 시작되는 것으로 판단된다.

주사전자현미경을 통한 #03 시료의 미세조직을 비교하면 800℃ 재소성 시편에서도 초기 유리질화가 관찰되어 본래 #03 시료는 이보다 낮은 온도에서 소성되었을 가능

성이 있다. 재소성 시편은 1,050℃부터 기질의 용융이 심화되어 기질과 혼입물의 경계가 무너지면서 좀 더 치밀해지고 미세공극이 생성되다가 1,200℃에서는 10μm 정도의 원형 기공을 형성한다. 따라서 석촌동 고분군에서 확인된 재결정이 진행된 다공질 시료는 1,100℃ 이상에서 소성되었을 것으로 보인다. 그러나 석촌동 고분군 변형기와 중 자회색 다공질 시료는 10μm 이상의 큰 기공(bloating pore)을 보여 1,200℃ 이상에서 과소성되었을 것으로 생각된다. 이를 종합적으로 살펴보면 1,000~1,100℃에서 광물 상전이와 재결정, 색과 기질의 변화가 나타나는 것으로 보이며, 열변형 특성이 발현되는 온도로 추정된다.

재소성실험을 통해 고온에서 원형기와의 물리적 및 광물학적 특성이 변화하는 과정을 추적할 수 있었다. 그러나 이번 실험은 산화환경의 전기가마에서 실시하였으므로 환원환경에서 잘 성장하는 것으로 알려진 헤르시나이트와 블로우팅 포어의 특성은 확인하기 어려운 한계도 있었다(Nodari *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2005).

Fig. 10. Cross sections of roof tile refired by temperature in oxidation atmosphere.

Table 6. Physical and mineralogical properties according to temperature stages for refiring experiment about the #03 sample

Refiring temperature	Chromaticity			Water absorption	Specific gravity	Minerals ¹	Vitrification ²
	L^*	a^*	b^*				
#03	63.95	14.31	27.90	16.73%	1.74	Q, K, P, M, Am	NV
800℃	65.55	18.52	32.82	18.01%	1.75	Q, K, P, M, Am, H	IV
850℃	63.50	21.30	34.50	18.27%	1.75	Q, K, P, M, Am, H	IV
900℃	65.36	21.10	35.37	18.32%	1.74	Q, K, P, M, Am, H	IV
950℃	63.82	23.27	36.95	17.17%	1.78	Q, K, P, Am, H	EV
1,000℃	59.26	26.84	36.54	15.68%	1.82	Q, K, P, Mu, H	EV
1,050℃	55.99	27.00	32.96	9.97%	1.99	Q, K, P, Mu, H, T	EV
1,100℃	44.81	24.28	23.08	4.71%	2.18	Q, K, P, Mu, H, T	CV
1,150℃	43.91	23.03	20.86	2.52%	2.22	Q, Mu, H, T	CV
1,200℃	40.80	14.54	10.64	0.63%	2.25	Q, Mu, H, T	CV

¹Abbreviations: Q; quartz, K; K-feldspar, P; plagioclase, M; mica, Am; amphibole, Mu; mullite, H; hematite, T; tridymite.

²NV; no vitrification, IV; initial vitrification, EV; extensive vitrification, CV; continuous vitrification(Maniatis and Tite, 1981).

Fig. 11. X-ray diffraction patterns and microstructure images according to refring temperature. Abbreviations: Q; quartz, K; K-feldspar, P; plagioclase, M; mica, Am; amphibole, Mu; mullite, H; hematite, T; tridymite.

4.3. 석촌동 고분군 출토 기와의 소성온도와 소성환경

재소성실험을 통한 기와의 물리적 및 광물학적 특성 변화를 토대로 기와의 소성온도를 구분하였다(Table 7). 소성온도의 추정에는 태토의 화학조성, 소성분위기, 유지시간, 가마구조와 가마 내 위치 등 다양한 변수가 존재하지만, 이 연구에서는 재소성실험 결과 중 물리적 특성과 광물 조성을 근거로 추정하였다.

원형기와는 황갈색 혹은 등황색의 표면색상을 보여 소성 당시 가마 내 산화환경이 조성되었을 것으로 보이나

부분적으로 회색계열 기와도 확인되어 기와의 소성분위기가 일정하지 않았을 것으로 생각된다. 석영, 장석류 외에 운모와 각섬석이 동정되어 원형기와 그룹 중 약 60% 정도가 900℃ 이하에서 저온소성되었다. 재소성실험을 통해 X-선 회절분석 결과에서 운모가 소멸되고 각섬석이 남아있는 시료는 900~950℃의 소성온도를 경험했을 것으로 추정된다. 운모와 각섬석이 모두 소멸되고 고온광물이 생성되지 않은 그룹은 재소성실험에서 확인되지 않았으나 전후 소성단계를 고려하면 950~1,000℃로 추정

Table 7. Interpretation of firing temperature for roof tiles

Group	Sample	Firing temperature	Sample	Firing temperature	Sample	Firing temperature
Original roof tiles	#01	1,000~1,100℃	#12	950~1,000℃	#20	700~900℃
	#02	700~900℃	#13	700~900℃	#21	900~950℃
	#03	700~900℃	#15	1,000~1,100℃	#26	700~900℃
	#07	700~900℃	#17	700~900℃	#27	700~900℃
	#08	700~900℃	#18	700~900℃	#28	1,000~1,100℃
	#09	950~1,000℃	#19	900~950℃		
Deformed roof tiles	#04	1,100~1,200℃	#11-1	1,000~1,100℃	#23-3	1,000~1,100℃
	#05-1	1,000~1,100℃	#11-2	1,000~1,100℃	#24	1,000~1,100℃
	#05-2	1,000~1,100℃	#14	1,000~1,100℃	#25	1,000~1,100℃
	#06-1	1,000~1,100℃	#16	1,000~1,100℃	#29-1	1,000~1,100℃
	#06-2	1,000~1,100℃	#22	1,000~1,100℃	#29-2	1,000~1,100℃
	#10	1,000~1,100℃	#23-1	700~900℃		

된다. 고온생성광물이 확인되어 1,000~1,100℃의 소성온도를 나타내는 시료도 있는데, 원형기와의 약 20% 이내로 확인된다.

한편 변형기와의 약 88%에서 멀라이트, 헤르시나이트, 적철석 등과 같은 고온생성광물이 동정되어 소성온도는 1,000~1,100℃ 범위로 추정된다. 일부에서는 장식류가 용융되어 회절선이 사라진 1,100~1,200℃ 구간 시료도 확인된다. 열변형 기와에서 관찰되는 10 μ m 내외의 원형기공(bloating pore)은 과소성에 의해 발생하였으며, 환원 환경에서 1,200℃ 이상일 때 나타난다고 보고된 바 있다(Jang and Lee, 2014).

또한 변형기와의 단면을 관찰하면 표면에는 적갈색의 치밀한 층을 형성하고, 내부에는 자회색 내지 청회색 속심을 나타내는데, 표면의 적갈색층에서 적철석이 동정되었으며, 내부 속심은 표면층보다 비교적 헤르시나이트의 회절선이 강하게 나타난다. 대부분의 변형기과에서 헤르시나이트가 동정되었는데, 선행연구에서는 환원환경에서 소성되거나 유기물과 같이 소성되었을 때 형성되는 환원 조건에서 생성된다고 보고한 바 있다(Nodari *et al.*, 2004; Maritan *et al.*, 2006). 따라서 이러한 샌드위치 구조는 완전한 산화 또는 환원환경이 갖춰지지 못한 환경에서 불균일한 소성이 이루어진 것을 의미하지만, 헤르시나이트 형성 등을 고려할 때 1,000℃ 이상에서 환원환경이 일정 시간 유지되었을 것으로 생각할 수 있다.

변형기와의 불균일한 소성환경은 기와의 용도와 밀접한 관계가 있을 것으로 보인다. 앞의 분석결과에서 석촌동 고분군 출토 기와들은 재료나 제작기법상 유사하게 제작되었고 변형기와는 이차적 고온을 경험한 것으로 조사되었다.

보통 삼국시대 기와는 관청 등의 건물지에서 나타나는 것이 일반적이며, 고분에서는 드물게 출토된다. 석촌동 고분군 기와는 다양한 종류의 기와가 나타나며, 기와를 건물에 올릴 때 사용되는 홍두께 흙이 확인되어 매장의례를 위한 목조건축물이 존재했고 건물 위에 기와를 올렸을 가능성이 있다. #24, #25 시료처럼 기와에 소토가 달라붙은 채 출토된 경우도 있어 시공된 상태에서 강한 열을 받은 것으로 판단된다. 소토의 소성온도 또한 1,200℃ 부근으로 추정된 바 있어 기와가 시공된 상태에서 고온에 일정 시간 노출된 것으로 판단된다(Seoul Baekje Museum, 2020). 기와의 시공은 보통 목조건축물의 존재를 의미하는데, 화장된 인골, 불 맞은 구슬과 금속, 열변형된 기와의 존재는 목조건축물 내에서 화장의례의 가능성을 나타낸다.

일반적으로 목조건축물에 화재가 발생했을 경우, 10분 내에 1,100℃ 이상에 도달하게 되는데(Roh and Ham, 2010), 이런 급격한 온도 상승과 온도 유지는 불균일한 소성환

경을 만들 수 있다. 석촌동 고분군에서 출토된 화장의례 관련 유물과 변형기와의 특성을 고려할 때, 목조건축물 내에서 화장과 관련된 의례 등으로 인해 건물 상단에 위치한 기와가 무너지거나 적재되어 고온을 경험하였을 가능성이 있다. 이 경우 불균일한 소성환경과 1,000~1,200℃의 온도상승 시 내부 기와와 외부 기와 간에 소성도 차이가 발생했을 가능성이 있는 것으로 생각된다.

5. 결 언

이 연구에서는 서울 석촌동 고분군 연접적석총 내 1호 매장의례부에서 출토된 기와의 물리적, 광물학적, 미세조직 특성을 중심으로 소성온도를 해석하고, 2차적인 고온으로 형태가 변하고 불균일하게 소성된 변형기와의 특성을 검토하였다.

1. 원형기와는 평균 흡수율이 약 15%로 비교적 높고 황색계열 표면 색조를 보인다. 태토의 기질은 치밀하며 세립질의 석영, 장식류, 운모, 각섬석 광물을 포함한다. X-선 회절분석 결과, 원형기와는 전반적으로 운모와 각섬석이 소멸되지 않아 900℃ 이하의 낮은 온도에서 소성되었을 것으로 판단된다.

2. 변형기와는 고온에 의한 치밀한 피막 형성, 용융물이 분출된 것처럼 보이는 미세기공 등 다양한 표면 특성이 관찰된다. 일부 시료는 기벽이 팽창한 특성(bloating)이 확인된다. 이런 특성은 한 시료 내에서 일부 영역에서만 관찰되거나 여러 특성이 공존하기도 한다. 흡수율은 평균 6%로 낮고, 표면은 적갈색의 치밀한 기질, 속심은 자회색의 다공성 기질로 구성된 샌드위치 구조로 확인된다. 적철석이 표면에서 확인되어 철의 산화상태가 기와 색상에 반영된 것으로 보인다. 미세조직 관찰 결과, 기질의 유리질화가 진행되었으며, 자회색 기질은 10 μ m 이상의 원형공극(bloating pore)도 관찰된다.

3. 태토의 화학조성은 타날 양식과 관계없이 유사하나 격자문 시료가 비교적 넓은 분포를 보여 태토 정선도가 다소 달랐을 가능성을 시사한다. 그러나 원형기와의와 변형기와의 주성원원소 분포가 유사하므로, 기와는 고분 축조 당시 함께 공급되었으나 일부 기와가 이차적 고온에 변형된 것으로 추정된다.

4. 재소성실험을 통해 1,000℃ 이상에서 기와의 물리적 및 광물학적 특성이 변화되는 것으로 생각되며, 흡수율이 급격하게 낮아지고, 운모와 각섬석이 소멸되며 고온생성광물이 동정되는 특성이 관찰된다. 1,050℃ 이상에서 점차 조직의 유리질화도 발달하여 변형기과 그룹과 상당히 유사한 열변형 특성이 확인된다.

5. 태토의 광물조성과 유리질화 정도를 고려할 때, 고

온으로 형태가 변형된 기와는 최소 1,000℃ 이상의 2차 고온을 경험하였으며, 일부는 재배치된 원형공극(bloating pore)도 관찰되어 1,200℃ 이상의 강한 열에 일정시간 노출되었을 것으로 판단된다. 또한 적갈색계열의 치밀한 피막과 용융된 물질이 돌출된 기공으로 볼 때 산화환경에서 급격한 온도 상승이 있었을 것으로 추정된다. 다만 기와에 고착된 소토를 고려할 때, 기와로 건축물을 조성한 후 2차 고온이 가해졌을 것으로 추정되며, 기와의 위치에 따라 불균일한 소성환경과 소성온도를 경험하였을 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D)의 일환으로 수행되었으며, 한성백제박물관의 시료 협조에 깊이 감사드린다.

References

- Chatfield, M. (2010) Tracing firing technology through clay properties in Cuzco, Peru. *Journal of Archaeological Science*, v.37, p.727-736. doi: 10.1016/j.jas.2009.11.003
- Choi, J.K. (2001) Tumulis of Gyeoseong in Changnyeong. Gyeongnam Institute for Archaeology, p.437-444. (in Korean)
- Han, M.S., Lee, M.H. and Ahn, G.S. (2019) Firing Temperature Analysis of Walls and Roof Tiles from the Jeseoksa Dump-Site, Excavation Report on the Jeseoksa Dump-SiteIII. Buyeo Research Institute of Cultural Heritage, p.248-259. (in Korean)
- Han, S.M., Shin, D.Y. and Kang, S.K. (1998) Preparation for Porous Ceramics Using Low Grade Clay. *Journal of the Korean Ceramic Society*, v.35, p.575-582. (in Korean with English abstract)
- Jang, S. and Lee, C.H. (2014) Mineralogical Study on Interpretation of Firing Temperature of Ancient Bricks: Focused on the Bricks from the Songsanri Tomb Complex. *Journal of Conservation Science*, v.30, p.395-407. (in Korean with English abstract). doi: 10.12654/JCS.2014.30.4.08
- Jo, Y.H., Lee, C.H., Yoo, J.H., Kang, M.K. and Kim, D.M. (2012) Petrological Classification and Provenance Interpretation of the Sungnyemun Stone Block Foundation, Korea. *MUNHWAJAE Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, v.45, p.174-193. (in Korean with English abstract). doi: 10.22755/kjchs.2012.45.3.174
- Kim, R.H. (2012) Material Characteristics and Clay Source Interpretation of U-shaped Jar Coffins from the Ancient Tombs in the Yeongsan River Basin, Korea. Ph.D. Dissertation, Kongju University, p.280-293. (in Korean with English abstract).
- Kim, R.H., Jung, J. and Lee, C.H. (2013) Clay Source Interpretation and Making Characteristics of Proto-Three Kingdoms Period Potteries from Cheonan and Asan in Korea: Focusing on the Bakjimeure Site. *Journal of Conservation Science*, v.29, p.171-185. (in Korean with English abstract). doi: 10.12654/JCS.2013.29.2.08
- Lee, C.H. and Kim R.H. (2012) Achievements and Tasks of Compositional Analysis for Jar coffins. The 5th Ancient Jar Coffins International Academic Symposium. Naju National Research Institute of Cultural Heritage. (in Korean)
- Lee, M.S., Chun, Y.G. and Kim, J. (2016) Study for Selection of Replica Stone of the Stele for Buddhist Monk Wongjong at Yeoju Godalsa Temple Site using Magnetic Susceptibility. *Journal of the Petrological Society of Korea*, v.25, p.299-310. (in Korean with English abstract). doi: 10.7854/JPSK.2016.25.3.299
- Maniatis, Y. and Tite, M.S. (1981) Technological Examination of Neolithic-Bronze Age Pottery from Central and Southeast Europe and from Near East. *Journal of Archaeological Science*, v.8, p.59-76. doi: 10.1016/0305-4403(81)90012-1
- Maritan, L., Nodari, L., Mazzoli, C., Milano, A. and Russo, U. (2006) Influence of firing conditions on ceramic products: Experimental study on clay rich in organic matter. *Applied Clay Science*, v.31, p.1-15. doi: 10.1016/j.clay.2005.08.007
- Nodari, L., Maritan, L., Mazzoli, C. and Russo, U. (2004) Sandwich structures in the Etruscan-Padan type pottery. *Applied Clay Science*, v.27, p.119-128. doi: 10.1016/j.clay.2004.03.003
- Park, J.Y., Kim, Y.T., Lee, K.G., Kang, S.G. and Kim, J.H. (2005) The mechanism of black core formation. *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, v.15, p.208-215.
- Quinn, P.S. (2013) *Ceramic Petrography: The Interpretation of Archaeological Pottery & Related Artefacts in Thin Section*. Oxford, p.97-100.
- Roh, S.K. and Ham, E.G. (2010) A Study on Characteristics of Roof 'Jucsim' Structure Combustion Real Scale Fire Test on Wooden Structure Heritage Building. *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, v.24, p.95-102. (in Korean with English abstract)
- Seoul Baekje Museum (2019) Excavation Report on the Connected Stone-mound Tomb North of Seokchon-dong Ancient Tomb No.1, Seoul. Seoul Baekje Museum, p.39-327. (in Korean)
- Seoul Baekje Museum (2020) Baekje's Roral Castle and Tomb Complex. Seoul Baekje Museum, p.143-145. (in Korean)
- Sinopoli, C.M. (1991) *Approaches to Archaeological Ceramics*. Lee, S.J.(translator). Gyeongnam Institute for Archaeology.
- Whitbread, I. (1995) *Greek Transport Amphorae-Petrological and Archaeological Study*. The British School at Athens, Fitch Laboratory Occasional Paper, 4, p.1-453.