

A Scientific Approach to the Non-Black Surface and Multicolored Core Roof Tile from the Sabi Period of the Baekje Kingdom Excavated at Gwanbuk-ri, Buyeo

Myeong-Kyu Kang^{1,2}, Hyun Ho Ahn¹, Hyunkyung Choi³, Sung Baek Kim¹, and Chul Sung Kim^{2,4*}

¹Department of Biomedical Materials, Konyang University, Daejeon 35365, Korea

²ASK Corporation, Gyeonggi-do 14058, Korea

³HANARO Utilization Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

⁴Department of Physics, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

(Received 14 July 2025, Received in final form 6 August 2025, Accepted 7 August 2025)

This study investigates a non-black roof tile excavated from the kiln site at Gwanbuk-ri (51-1, Guari), a central archaeological site of the Baekje Sabi period, to examine the mineralogical and magnetic properties associated with color variations between the surface and core, and to estimate its firing conditions. Based on chromatic characteristics of the cross-section, the tile was divided into three distinct zones: Surface-YB (Yellowish Brown), Core-LYB (Light Yellowish Brown), and Core-BL (Black). Major mineral compositions were identified as quartz, feldspars, and mica, suggesting that the roof tile was fired at temperatures below approximately 850°C. In particular, the Core-LYB zone showed a significant reduction in carbon content and the formation of hematite, as confirmed through Mössbauer spectroscopy, indicating exposure to relatively high heat in an oxidizing atmosphere. In contrast, the Surface-YB and Core-BL zones retained residual carbon due to rapid heat dissipation and limited heat transfer, and no hematite was detected. Magnetic properties further revealed that hematite acted as the primary magnetic mineral, supporting the interpretation that the roof tile was fired under a non-uniform oxidizing condition. This study contributes to a deeper scientific understanding of roof tile production technology and firing environments during the Sabi period of the Baekje Kingdom, and provides foundational data for the restoration and preservation of ancient architectural materials.

Keywords : Mössbauer spectroscopy, Vibrating sample magnetometer (VSM), Baekje Sabi period, Roof tiles, Chromaticity

부여 관북리 출토 백제 사비기 비흑색 기와의 표면 및 다색조 속심에 대한 과학적 분석

강명규^{1,2} · 안현호¹ · 최현경³ · 김성백¹ · 김철성^{2,4*}

¹건양대학교 의료신소재학과, 대전광역시 서구 관저동로 158, 35365

²(주)에스크, 경기도 안양시 동안구 별말로 66, 14058

³한국원자력연구원 하나로이용부, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111, 34057

⁴국민대학교 물리학과, 서울시 성북구 정릉로 77, 02707

(2025년 7월 14일 받음, 2025년 8월 6일 최종수정본 받음, 2025년 8월 7일 게재확정)

본 연구는 백제 사비기의 중심 유적지인 부여 관북리(구아리 51-1번지)에서 출토된 비흑색 기와를 대상으로, 표면과 속심부의 색상 차이에 따른 광물학적, 자기적 특성을 규명하고 소성 조건을 추정하고자 하였다. 분석 대상 기와는 단면의 색도에 따라 Surface-YB(Yellowish Brown), Core-LYB(Light Yellowish Brown), Core-BL(Black)로 구분하였다. 주요 광물 조성은 석영, 장석류, 운모 등으로 확인되며, 전반적으로 약 850°C 이하에서 소성된 것으로 판단된다. 특히 Core-LYB 부위에서는 탄소 함량 감소와 함께 피스마우어 분광 분석을 통해 적철석의 형성을 확인하였으며, 이는 해당 부위가 산화 환경에서 상대적으로 높은 열에 노출되었음을 시사한다. 반면, Surface-YB와 Core-BL 부위에서는 빠른 열 방출과 제한된 열 전달로 인해 탄소가 일부가 잔존하고 적철석은 관찰되지 않는다. 자기적 특성 분석 결과에서도 적철석이 주요 자성 광물로 작용한 결과가 나타나, 해당 기와가 불균일

한 산화 분위기에서 소성된 것으로 해석된다. 본 연구는 백제 사비기 기와의 제작 기술과 소성 환경에 대한 과학적 이해를 심화하며, 고대 건축 재료의 복원 및 보존을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다는 점에서 의의를 가진다.

주제어 : 피스비우어 분광기, 진동시료형자력계, 백제 사비기, 기와, 색도

I. 서론

기와는 한국 고대 건축에서 지붕을 덮는 주요 건축 재료로 사용되어왔다. 단순한 기능적 요소를 넘어 색상과 형태, 문양을 통해 건축물의 위계와 기능을 시각적으로 드러냄으로써, 정치적·종교적 상징성을 갖춘 건축 문화유산으로 자리매김해왔다[1,2]. 백제 사비기(538-660년)[3]에 이르러서, 기와는 왕궁, 관청, 사찰 등 국가적·종교적 성격을 지닌 건축물에 한정적으로 사용될 만큼 귀중한 재료로 인식되었다[4,5]. 이러한 인식은 기와의 생산과 공급 체계에도 영향을 미쳐, 관영 가마와 사찰 전용 가마가 대규모로 운영되기에 이르렀다[6]. 더불어 기와 제작을 전담하는 전문 와공 조직인 ‘와박사’ 제도가 마련되어, 생산과 기술이 체계적으로 관리되었고[7-9], 이러한 기와 제작 기술은 국가 주도의 제도적 기반 위에서 점차 고도화되며, 정교하고 조직적인 기술 체계로 발전해 나간 것으로 평가된다.

백제 시대에 제작된 기와는 흑색, 회갈색, 황갈색, 혹은 회흑색을 띠는 것이 특징이다[10,11]. 이러한 기와는 점토를 채취하고 정제한 뒤, 성형, 건조, 소성의 과정을 거쳐 제작되며 [12-14], 이 과정에서 소성 온도, 가마 내부의 산화·환원 분위기는 기와의 색상과 물리적 특성에 영향을 미친다[15-18]. 이렇게 소성된 기와는 전체적으로 균일한 흑색을 띠지만, 과소성과 같은 특정한 소성 조건이나 가마 구조, 그리고 소성 중 산화·환원 분위기의 불균형 또는 연료에 의한 탄소 침착에 따라, 기와의 발색이 달라지거나 표면과 속심부의 색이 다른 다중 색상 구조가 나타날 수 있다[18-20]. 이러한 기와의 표면과 속심부의 색상 차이는 제작 과정에서 작용한 물리·화학적 조건을 반영하는 지표로 활용될 수 있으며, 나아가 당시의 건축 문화와 기술 수준 그리고 사회 구조를 이해하는데 있어서 중요한 단서를 제공할 수 있다.

본 연구는 백제 사비기의 대표 유적지인 부여 관북리 유적 가마터(구아리 51-1번지)에서 출토된 기와 중, 표면과 속심의 색상이 다른 비흑색 기와를 선정하였다. 기와의 표면과 속심부를 대상으로, 다양한 분석 기법을 활용하여 광물학적 및 자기적 특성을 규명하였으며 이를 기반으로 해당 기와의 소성 조건을 추정하였다.

II. 연구 방법

분석 대상 시료는 부여 관북리에서 출토된 기와 중, 표면

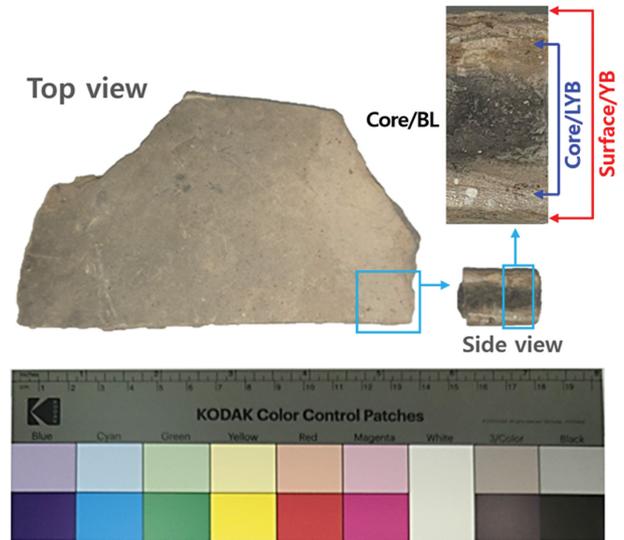


Fig. 1. (Color online) Photograph of the roof tile from the Sabi period (Buyeo) of the Baekje Kingdom, along with an optical microscopy cross-sectional image indicating the surface region (Surface-YB) and core regions (Core-LYB and Core-BL).

이 Yellowish brown이고 속심이 Light yellowish brown 또는 Black 색상을 띠는 비흑색 기와 1점을 선정하였다. 본 연구에서는 이 세가지 색상 구간을 각각 Surface-YB(Yellowish brown), Core-LYB(Light yellowish brown), Core-BL(Black)로 구분하여 명명하였다. 이후 서술에서는 이러한 약어를 사용하여 기와의 부위별 분석 결과를 기술하였다. 해당 유물은 국립부여문화유산연구소로부터 제공받았으며, 기와의 외형적 특징은 Fig. 1에 제시하였다. 기와의 표면 오염물은 건조한 상태에서 붓과 질소 가스를 이용하여 제거하였다. 단면 관측용 시료는 다이아몬드 휠을 이용하여 절단한 후 #800, #1000, #2000 순서의 연마지를 사용하여 단계적으로 연마하였다. 분석용 분말 시료는 기와를 색도 기준에 따라 세 부위(Surface-YB, Core-LYB, Core-BL)로 나누어 각각 다이아몬드 휠로 채취한 후 분말화 하였다.

준비한 단면 시료는 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope, Apero 2, Thermo Scientific)을 이용하여 광물과 미세조직을 관찰하였다. 기와의 색도는 자외선-가시광 분광광도계(UV-Vis spectrometer, UV-2450, Shimadzu)에 MPC-220을 장착하여 측정하였다. 측정값의 신뢰성을 확보하기 위해 반복 측정하였으며, 수집된 색도 데이터는 L*a*b* 색 공간 체계에 따라 수치화하여 표현하였다. 주요 광물 조성은 X선 회절 분석(XRD, X-ray Diffraction, D2 Phaser, Bruker)

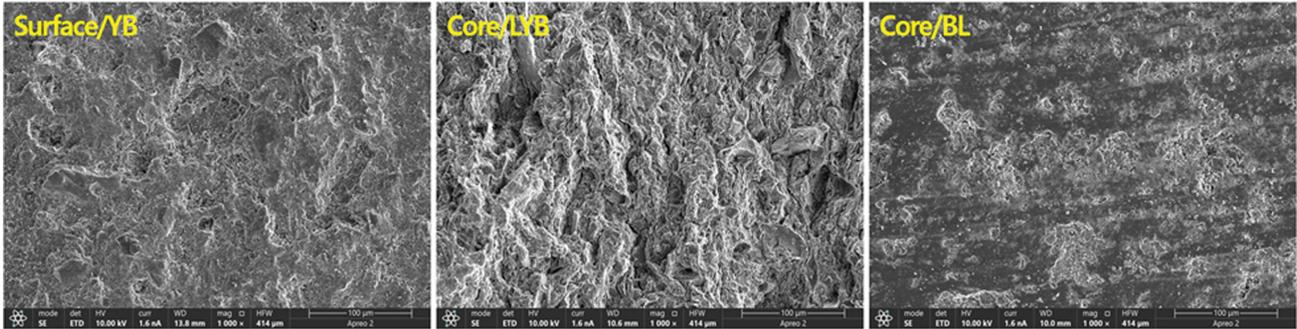


Fig. 2. (Color online) SEM images of the roof tile showing the Surface-YB, Core-LYB, and Core-BL regions.

Table I. EDS results from the surface and core regions of the excavated roof tile.

Sample	Element (Atomic %)							
	Si	Al	Fe	K	Ca	Mg	Ti	Na
Surface-YB	54.78	26.46	10.06	3.47	0.88	2.18	0.79	1.39
Core-LYB	55.67	27.86	8.61	3.06	0.69	1.59	0.75	1.77
Core-BL	61.88	22.78	7.94	2.81	0.53	1.40	0.67	1.99

을 통해 확인하였다. 기와 내 유기 성분(C, H, N)은 자동 원소분석기(EA, Elemental Analyzer, FlashSmart, Thermo Scientific)를 사용하여 분석하였으며, 주요 원소 조성은 SEM 장비에 부착된 에너지 분산형 분광기(EDS, Energy Dispersive Spectroscopy)를 통해 확인하였다. 또한 푸리에 변환 적외선 분광기(FI-IR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT/IR-4X, JASCO)를 활용하여 650~2,000 cm^{-1} 범위에서 기와 내 주요 광물의 작용기 및 분자 결합 특성을 분석하였다. 이를 통해 소성 과정 중 점토 광물의 열분해 여부를 검토하였다. 마지막으로, 기와의 자기적 특성을 분석하기 위하여 진동시료형 자화율 측정기(VSM, Vibrating Sample Magnetometer, Model 7400, LakeShore Inc.)와 뫼스바우어 분광기(Mössbauer Spectroscopy)를 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

기와와 같이 흙을 빚어 구워 만든 도토류(陶土類)는 태토를 구성하는 원료 성분뿐만 아니라 소성 온도와 환경에 따라 다양한 색상이 나타날 수 있다[21-23]. 기와의 단면을 광학 현미경으로 관찰한 결과, 표면에서 속심부로 갈수록 명확한 색상 차이를 보였으며, 이를 Fig. 1과 같이 세 부위(Surface-YB, Core-LYB, Core-BL)로 구분하였다. SEM 관찰은 SE mode로 촬영하여 기공을 확인하고자 하였으며, SEM 이미지는 Fig. 2에 제시하였다. 소성 온도가 높아질수록 점토 입자 간 결합이 진행되면서 느슨한 조직이 점차 치밀해져 기공률이 감소하고, 일부 광물 성분은 유리질화되어 단면이 매끄럽고 단단한 조직으로 전환된다[24]. 기와의 세 부위에서는 기질 입

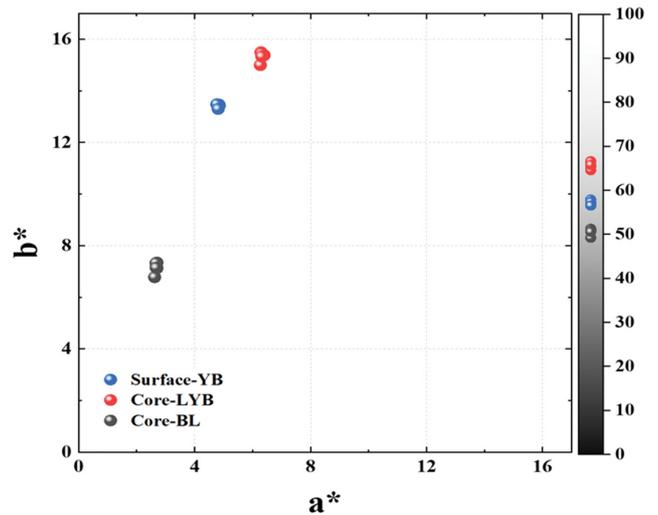


Fig. 3. (Color online) L*a*b* color values for the surface and core regions of the roof tile.

자 간 공극이 거의 관찰되지 않는 치밀하고 매끄러운 단면 조직을 보였다. 각 부위의 주요 원소 분포를 파악하기 위해 EDS 분석한 결과는 Table I에 제시하였다.

기와의 표면 및 속심부의 색도 측정 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 측정값에 따르면, Core-BL은 $L^* = 49.20\sim 50.94$, $a^* = 2.62\sim 2.70$, $b^* = 6.78\sim 7.35$ 로, 세 부위 중 가장 낮은 색도 값을 나타냈다. 반면, Core-LYB은 $L^* = 65.40\sim 66.62$, $a^* = 6.28\sim 6.40$, $b^* = 15.0\sim 15.45$ 로 가장 높은 색도 값을 보였다. 기와의 표면부인 Surface-YB($L^* = 56.53\sim 57.89$, $a^* = 4.77\sim 4.85$, $b^* = 13.30\sim 13.47$)와 깊은 속심부인 Core-BL의 색도 차이는, 소성 중 가마 내 분위기가 균일하지 않았

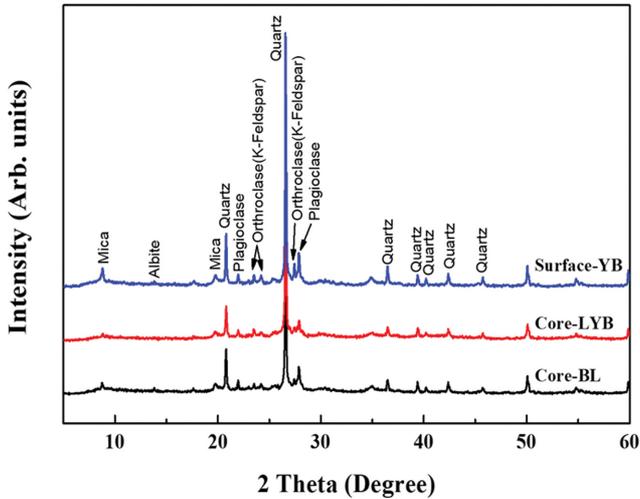


Fig. 4. (Color online) XRD patterns of the surface and core regions of the roof tile.

음을 보여주며 이는 해당 기와가 불균일한 소성 환경에서 제작되었을 가능성을 보여준다.

출토된 기와를 색도 기준에 따라 세 부위로 구분한 뒤, 각 부위에 대한 XRD 분석을 실시하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 부위에서 공통적으로 석영(Quartz)이 주요 광물로 확인되었으며, 이 외에도 정장석(Orthoclase), 사장석(Plagioclase), 알바이트(Albite), 운모(Mica)가 검출되었다. 또한, 모든 부위에서 고온 지시광물(High-temperature indicator minerals)로 분류되는 물라이트(Mullite), 크리스토팔라이트(Cristobalite) 등의 광물은 확인되지 않았다[25,26]. 반면, 900°C 이상에서 열분해되는 운모가 검출된 점으로 미루어 볼 때, 해당 기와는 약 850°C 이하의 온도에서 소성되었을 것

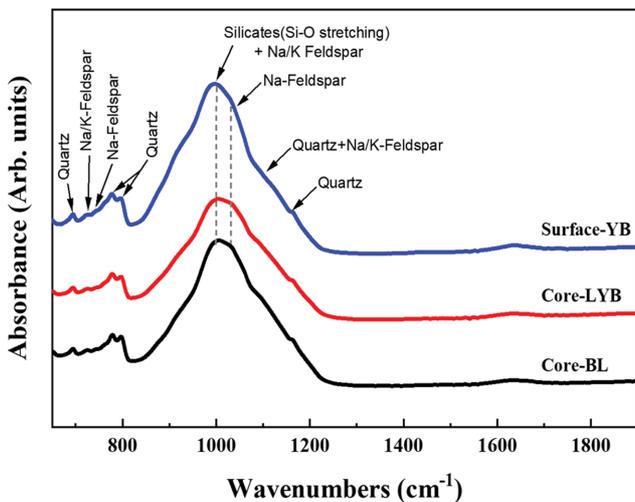


Fig. 5. (Color online) FT-IR spectra obtained from the surface and core regions of the excavated roof tile.

Table II. Peak positions of mineral groups detected by FT-IR analysis.

Mineral	Wavenumber (cm ⁻¹)
Quartz	1,160, 1,090, 796, 777, 690
Na-feldspar	1,040, 743, 724
K-feldspar	1,090, 992, 725
Silicates	900~1,200

Table III. CHN elemental analysis from the surface and core regions of the roof tile.

Element	Surface-YB	Core-LYB	Core-BL
C	0.7177	0.1857	0.5891
H	0.0365	0.0682	0.0341
N	0.7134	0.7977	0.7892

로 추정된다[27].

Fig. 5의 FT-IR 분석 결과에 따르면, Surface-YB, Core-LYB, Core-BL 모든 부위에서 유사한 규산염(Silicates) 광물의 흡수 피크가 관찰되었다. 900~1,200 cm⁻¹ 영역에서는 Silicates(Si-O stretching)에 해당되는 넓은 흡수대가 공통적으로 나타났으며, 1,040, 1,090, 1,160 cm⁻¹ 부근에서는 석영과 Na/K-Feldspar의 피크가 확인되었다[28,29]. 이러한 피크 분포는 세 부위 간 광물학적 조성이 크게 다르지 않음을 보여주며, 이는 소성에 따른 점토 광물의 열분해나 작용기 변화가 크지 않았음을 시사한다. FT-IR 측정을 통해 분석된 광물의 흡수 대역은 Table II에 제시하였다.

이번에는 EA 분석을 이용하여 각 부위의 유기물 함량을 측정하였다. EA 측정은 여러 차례 반복하여 평균값을 산출하였으며, 그 결과는 Table III에 제시하였다. Surface-YB에서 탄소(C) 함량이 높게 측정된 것은 유기물이 완전히 연소되지 않고 일부 잔류하고 있음을 나타낸 반면, Core-LYB는 탄소 함량이 낮게 측정되어 유기물이 대부분 연소되었음을 보여준다[30-32]. 이러한 결과로부터, Core-LYB 부위는 유기물이 가장 많이 연소된 열 피크 구간일 가능성이 높으며, 이 부위에 열이 오랜 시간 또는 집중적으로 작용했을 것으로 판단된다. 한편, Core-BL에서는 탄소 함량이 다시 다소 증가하였는데, 이는 해당 부위에 상대적으로 열이 덜 전달되어 유기물이 완전히 연소되지 않고 일부 잔류했음을 의미한다. 따라서 기와 중심부에 해당하는 Core-BL 부위는 열이 충분히 도달하지 못해 유기물이 덜 분해된 내부 탄화물 층으로 추정된다. 또한, 소성 환경과 기와의 열전도 특성으로 인해 표면에서 중심부로 열이 전달되는 과정에서 탄소 함량이 감소(0.7177 → 0.1857)하였다가, 다시 증가(0.1857 → 0.5891)하는 양상이 관찰되었다. 이는 열의 전달 경로와 축적 양상에 따른 유기물의 열분해 반응 차이를 반영하는 것으로 보인다. 기와의 소

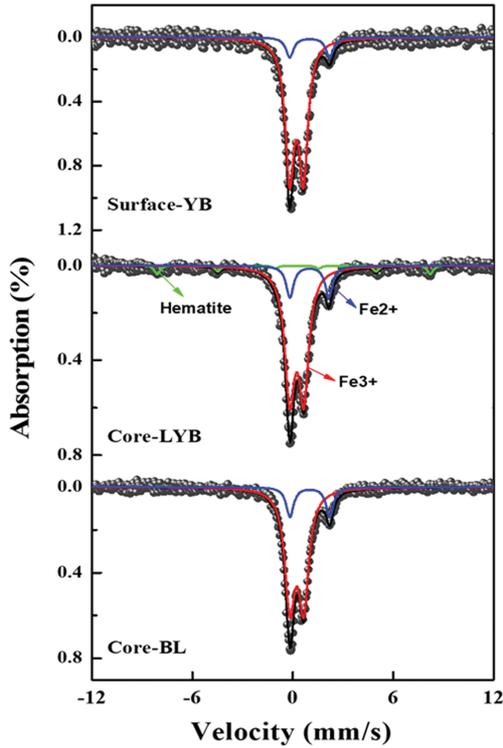


Fig. 6. (Color online) Mössbauer spectra of the surface and core regions of the roof tile.

성 과정에서 열이 외부 표면에서 내부로 전달되는데, 이 과정에서 Core-LYB 부위는 구조적으로 열이 상대적으로 축적되기 쉬운 중간 위치에 놓여 있어 유기물이 가장 활발하게 분해된 것으로 판단된다. 반면, 표면부(Surface-YB)는 열에 직접 노출되었음에도 빠른 열 방출로 인해 일부 유기물이 탄화된 채 잔류하였으며, 가장 깊은 속심(Core-BL) 부위는 열의 도달이 제한되어 유기물이 비교적 많이 잔존하는 경향을 보인다. 이러한 유기물 분포 특성은 소성 과정 중 열의 전달 및 축적 조건에 따라 발생한 차이로 해석될 수 있으며, 특히 Core-LYB 부위는 열 축적 효과에 의해 강한 열분해 반응이 일어난 것으로 추정된다.

추가적으로, Fig. 6과 Table IV에 제시된 뫼스바우어 분석

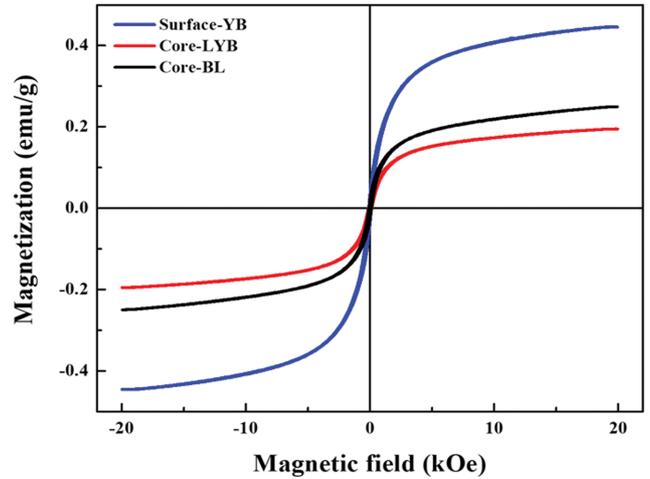


Fig. 7. (Color online) Magnetic hysteresis curves of the surface and core regions of the roof tile.

결과에 따르면, Surface-YB와 Core-BL에서는 Fe²⁺ 기반 규산염 광물에 기인하는 약한 Fe²⁺ 이중선과, Fe³⁺ 기반 규산염 또는 초상자성 산화철 입자의 존재를 나타내는 우세한 Fe³⁺ 이중선이 관찰되었다[3]. 반면, Core-LYB에서는 Fe²⁺ 및 Fe³⁺ 이중선 외에도 육중선의 적철석(Hematite)이 추가적으로 확인되었다. 적철석이 Core-LYB 부위에서만 선택적으로 검출된 점은, 해당 부위가 산화 분위기 하에서 표면보다 높은 온도에 도달했음을 시사한다[33]. 이러한 결과는 EA 분석에서 Core-LYB 부위의 탄소 함량이 현저히 낮게 나타난 것과 일치하며, 해당 부위에 열이 집중되어 유기물이 대부분 연소되고, 철 성분이 일부 산화되어 적철석이 형성된 것으로 해석할 수 있다. 마찬가지로, XRD 분석을 통해 Core-LYB 부위에서는 높은 온도의 영향으로 표면(Surface-YB)에 비해 운모(9° 부근) 및 정장석(27° 부근)에서 나타나는 회절 피크의 강도가 상대적으로 감소한 양상이 관찰된다. 반면, Surface-YB 및 Core-BL 부위는 각각 빠른 열 방출과 제한된 열 전달로 인해 적철석이 형성되기 위한 충분한 온도에 도달하지 못했을 가능성이 높다.

기와의 표면과 속심부의 자기이력곡선 결과는 Fig. 7과

Table IV. Mössbauer parameters of the roof tile.

Sample	Phase	Hyperfine field (kOe)	Quadrupole splitting (mm/s)	Isomer shift (mm/s)	Line-width (mm/s)	Area (%)
Surface-YB	Fe ³⁺	-	0.82	0.22	0.66	88.62
	Fe ²⁺	-	2.37	1.02	0.55	11.38
Core-LYB	Fe ³⁺	-	0.83	0.24	0.75	74.49
	Fe ²⁺	-	2.32	1.02	0.54	14.07
	Hematite	506.5	-0.10	0.15	0.40	11.44
Core-BL	Fe ³⁺	-	0.83	0.24	0.75	83.96
	Fe ²⁺	-	2.35	1.02	0.54	16.04

Table V. Hysteresis parameters of the roof tile.

Parameter	Surface-YB	Core-LYB	Core-BL
M_s (emu/g)	0.4458	0.1950	0.2497
M_r (emu/g)	0.0030	0.0180	0.0230
H_c (Oe)	93.55	129.31	111.53

Table V에 나타내었다. 세 부위의 포화자화(Saturation magnetization, M_s), 잔류자화(Remanent magnetization, M_r), 보자력(Coercivity, H_c) 값은 0.1950~0.4458 emu/g, 0.0030~0.0230 emu/g, 93.55~129.31 Oe으로 확인되었다. 이는 일반적으로 강한 자화 특성을 보이는 자철석(Magnetite)이나 마그헤마이트(Maghemite)보다는 적철석의 자화 특성과 유사한 값을 나타낸다. 따라서 해당 기와는 적철석이 주요 자성 광물로 작용한 것으로 추정된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 출토 기와의 광물 조성, 유기물 함량 및 자기적 특성을 종합적으로 분석하여 소성 조건과 열 분포 양상을 규명하였다. 광학현미경과 색도 측정 결과, 기와 단면의 색상은 뚜렷한 차이를 보이며 표면(Surface-YB), 속심부(Core-LYB, Core-BL)의 세 부위로 구분되었다. XRD 분석을 통해 모든 부위에서 석영, 장석류 및 운모가 주요 광물로 확인되었고, 고온 지시광물은 검출되지 않았다. 반면, 운모의 열 분해로 보아 전체 소성온도는 약 850°C 이하로 추정된다. FT-IR 분석에서는 세 부위 모두에서 유사한 규산염 계열 광물의 흡수 피크가 확인되었으며, 이는 광물학적 조성이 소성 과정 중 크게 변화하지 않았음을 시사한다. EA 분석 결과, Core-LYB 부위에서 탄소 함량이 현저히 낮게 나타났으며, 이는 해당 부위에 열이 집중적으로 축적되어 유기물의 열분해가 가장 활발히 일어난 열 피크 구간임을 의미한다. 반면, 표면(Surface-YB)과 깊은 속심(Core-BL) 부위에서는 각각 빠른 열 방출 또는 열 전달의 부족으로 인해 일부 유기물이 잔류하는 경향을 보였다. 피스바우어 분석에서는 Core-LYB에서만 적철석이 검출되었으며, 이는 해당 부위가 상대적으로 높은 온도에 도달했음을 시사한다. 이러한 결과는 EA 분석에서의 탄소 소실 경향과도 일치하며, 광물학적 변화가 국부적으로 집중되었음을 보여준다. 자기이력곡선 분석에서는 전체적으로 낮은 포화자화 값이 확인되었고, 이는 적철석이 주요 자성광물로 작용했음을 뒷받침한다. 종합적으로 볼 때, 본 기와는 불균일한 산화 분위기에서 약 850°C 이하의 온도 조건에서 소성된 것으로 판단되며, 단면 내 열의 분포는 균일하지 않고 구조적 위치에 따라 차등적으로 작용한 것으로 해석된다. 이러한 결과는 기와 제작 시 열 환경의 복잡성과 소성

조건이 단면 특성에 반영되었음을 보여주는 과학적 근거 자료로서 중요한 의미를 가진다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 지원을 받아 한국연구재단 중견연구자지원사업(NRF)(RS-2024-00339043)의 지원을 받아 수행되었습니다. 시료를 제공해 주신 국립부여문화유산연구소에 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] Y. W. Seo and J. C. Lee, *The Paek-San Hakpo* **128**, 241 (2024).
- [2] B. H. Lee, *Korean Society of Basic Design & Art* **12**, 397 (2011).
- [3] H. Choi, M. S. Han, D. H. Moon, C. S. Kim, S. W. Nam, and Y. R. Uhm, *Herit. Sci.* **12**, 236 (2024).
- [4] S. O. Lee, *Hanguk Kogo-Hakbo* **119**, 131 (2021).
- [5] W. C. Cho, *Munhwasa Hak* **34**, 39 (2010).
- [6] B. H. Lee, *Journal of History and Culture* **52**, 81 (2014).
- [7] B. H. Lee, *MAHAN BAEKJE MUNHWA* **40**, 52 (2022).
- [8] G. S. Yang, *PAEKCHE - MOONHWA* **1**, 129 (2013).
- [9] B. H. Lee, *Prehistory and Ancient History* **64**, 113 (2020).
- [10] B. H. Lee, *PAEKCHE - MOONHWA* **1**, 283 (2014).
- [11] H. W. Shin, J. H. Park, and C. H. Lee, *J. Conserv. Sci.* **40**, 609 (2024).
- [12] S. Y. Jang, C. H. Lee, and D. S. Park, *J. Conserv. Sci.* **22**, 15 (2008).
- [13] So. Y. J., *The Journal of Korean Field Archaeology* **18**, 131 (2013).
- [14] H. J. Kim, *Korean J. Heritage: Hist. Sci.* **52**, 56 (2019).
- [15] K. Wiśniewska, W. Pichór, and E. Kłosek-Wawrzyn, *Materials* **14**, 6380 (2021).
- [16] Y. D. Choi, *Korean Soc. Sci. Art.* **21**, 417 (2015).
- [17] K. Y. Chung, *J. Archit. Hist.* **20**, 23 (2011).
- [18] K. Ahn and M. S. Han, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **332**, 5289 (2023).
- [19] V. Cantavella, A. Moreno, A. Mezquita, D. Llorens, J. Barberá, and A. Palanques, *Proceedings of the IX World Congress on Ceramic tile Quality-Qualicer 2006*, P.BC147 (2006).
- [20] H. Aoyama, K. Yamagiwa, and W. Taira, *PLoS One* **17**, e0277560 (2022).
- [21] D. H. Kim, H. S. Lee, J. H. Kim, and M. S. Han, *Conservation Science in Museum* **25**, 35 (2021).
- [22] Y. A. Park, K. H. Kim, Y. R. Jeon, and N. Y. Kim, *J. Conserv. Sci.* **33**, 131 (2017).
- [23] M. R. Park and H. Lim, *The Journal of the Korean Society of Ceramic Art* **14**, 41 (2017).
- [24] Y. A. Park and W. R. Han, *J. Conserv. Sci.* **39**, 386 (2023).
- [25] A. B. Thompson and M. Wennemer, *Am. Mineral.* **64**, 1018

- (1979).
- [26] M. S. Tite, *Archaeometry* **11**, 131 (1969).
- [27] S. G. Barlow and D. A. C. Manning, *Br. Ceram. Trans.* **98**, 122 (1999).
- [28] E. Balliana, E. M. C. Caveri, L. Falchi, and E. Zendri, *Colorants* **2**, 533 (2023).
- [29] F. Bosch-Reig, J. V. Gimeno-Adelantado, F. Bosch-Mossi, and A. Doménech-Carbó, *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* **181**, 7 (2017).
- [30] M. Gabasio, J. Evin, G. B. Arnal, and P. Andrieux, *Radiocarbon* **28**, 711 (1986).
- [31] K. S. Ahn and M. S. Han, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **332**, 5289 (2023).
- [32] G. Cultrone, C. Rodriguez-Navarro, E. Sebastian, O. Cazalla, and M. J. De La Torre, *Eur. J. Mineral.* **13**, 621 (2001).
- [33] R. H. Kim and C. H. Lee, *J. Conserv. Sci.* **28**, 193 (2012).