

Interpretation of Iron Oxide-Based Red Pigments in Ancient Gaya: A Focus on Mössbauer Spectroscopy

Young Rang Uhm* and Hyunkyung Choi

HANARO Utilization Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon 34057, Korea

Dong Hyeok Moon

Geological Survey Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea

Min Su Han

Dept. of Heritage Science and Technology Studies, Korea National University of Heritage, Buyeo 33115, Korea

Chul Sung Kim

Dept. of Nano-Electro Physics, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

(Received 26 June 2025, Received in final form 4 August 2025, Accepted 7 August 2025)

This commentary reviews the multi-analytical study by Moon et al. (2023) on iron oxide-based red pigments from ancient Gaya, focusing on their composition, crystallinity, magnetic properties, and color. The study shows that Gaya people intentionally produced and used different types of pigments—such as natural ochre and heat-treated hematite for specific purposes. Mössbauer spectroscopy proved essential for detecting nanoscale and amorphous iron oxides, offering key insights into pigment thermal treatment and production processes. This commentary also explores the broader archaeometric applicability of these techniques. In particular, it proposes a novel methodology for determining the thermal history of red pigments based on variations in magnetic hyperfine field, by comparing Mössbauer spectra of ancient Gaya pigments with those of ochre-based pigments used in traditional Dancheong painting from the Joseon dynasty, specifically before and after heat treatment of ochre from Ulleungdo. Finally, it outlines potential future applications of these approaches in cultural heritage conservation, traditional pigment reproduction, and the analysis of iron-based archaeological materials.

Keywords : Ancient Gaya, Iron oxide pigments, Mössbauer spectroscopy, Thermal treatment for pigment technology, Hematite, Magnetic hyperfine field

고대 가야의 철산화물 기반 적(赤)색 안료에 대한 해석: 뫼스바우어 분광법을 중심으로

엄영랑* · 최현경

한국원자력연구원 하나로이용부, 대전광역시 대덕대로 989번길 111, 34057

문동혁

한국지질자원연구원 지질조사연구본부, 대전광역시 과학로 124, 34132

한민수

한국전통문화대학교, 유산기술학과, 부여군 백제문로 367, 33115

김철성

국민대학교, 나노-전자 물리학과, 서울 정릉로 77, 02707

(2025년 6월 26일 받음, 2025년 8월 4일 최종수정본 받음, 2025년 8월 7일 게재확정)

본 해설 논문은 D. H. Moon 등(2023)의 고대 가야 적색 안료에 대한 다중 분석 연구 논문을 기반으로 피스바우어 분광법을 중심으로 안료의 열처리 여부를 고찰하여, 고대 사회의 안료 제작 기술에 대한 고고학적 의미를 재 조명하였다. 주사전자현미경, X-선회절, 라만 및 피스바우어 분광법을 활용한 분석 결과를 통합적으로 고찰한 결과, 고대 가야인들이 열처리와 원료 선택을 통해 자연 황토와 열처리를 한 황토 그리고 고순도 적철석 등의 적(赤)색 안료들을 목적에 따라 생산·보관·사용하였음을 보여주었고, 특히 피스바우어 분광법은 기존의 분석 기법으로는 구분이 어려운 비정질 및 초미세 철 산화물의 자성 상태와 결정화도를 민감하게 판별함으로써, 안료의 열처리 여부와 제작 공정을 추론하는 핵심적 역할을 하였다. 본 해설 논문은 이러한 분석 기법의 고고학적 응용 가능성을 정리함과 동시에, 추가적으로 조선시대 단청안료로 사용되던 울릉도 석간주(황토구미)의 열처리 전과 후의 피스바우어 분광 결과와 비교하면서 안료의 열처리 여부를 초미세자기장값으로 유추할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한, 향후 문화재 보존, 전통 안료 재현, 철기 유물 분석 등에서의 피스바우어 분광 분석의 활용 방향을 제시한다.

주제어 : 고대가야, 철산화물 안료, 피스바우어 분광법, 고대 안료 제작기술, 적철석, 초미세자기장

I. 서 론

2023년 D. H. Moon 외 연구진들이 발표한 고대 가야 지역의 철산화물 기반 적색 안료에 대한 연구는 가야 고분군 4곳에서 출토된 안료의 제작 기원을 밝히기 위해 주사전자현미경(SEM-EDS), X선 회절(XRD), 라만 분광(raman spectroscopy), 피스바우어 분광(Mössbauer spectroscopy) 등 다양한 다중 분석 기법을 활용하였다[1]. 이 연구는 자연산 안료와 인공 열처리 안료를 구분하고, 그 제작 방식을 고고학적으로 해석하는 데 목적이 있었다[1]. 본 해설에서는 이 분석 결과를 보완하기 위해, 창녕 지역의 고동과 송현동 고분군 No. 63 벽체 유물을 추가적으로 측정하고 조선시대 단청에 사용된 울릉도황토구미(석간주)와 비교 분석하였다[2-4].

선사 시대 이래로 인류는 그림, 건축, 조각, 토기 등 다양한 재료에 광물 기반의 안료를 이용해 채색과 장식, 의례적 상징 부여 등 다양한 목적으로 활용해 왔다[5-7]. 이 중에서도 철산화물 기반의 붉은 안료는 가장 널리 사용된 안료 중 하나로, 그 기원은 네안데르탈인까지 거슬러 올라간다[5-11]. 일반적으로 천연 황토는 Fe^{3+} 기반 산화물과 옥시수산화물(oxyhydroxides)을 포함하고 있어, 쉽게 구할 수 있는 값싼 적색 안료의 원료가 된다. 황토를 열처리하면 약강자성(Weak-ferromagnetic)을 띠는 결정질 적철석(hematite, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)으로 변형되어 선명한 적색 안료로 사용되며, 이는 고대부터 널리 활용되어 왔다[12]. 최근에는 이러한 열처리 과정이 색상과 결정성, 입자 크기, 순도, 자성 특성 등에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구도 활발히 진행되고 있다[12,13]. 우리나라에서도 이러한 산화철 기반 적색 안료가 모든 역사적 시기에 걸쳐 고고학 유적지와 문화유산에서 발견되는데, 특히 고분에서 거행된 홍색 제례는 철기 시대 이후 성립된 고대 왕국들의 사회사상 및 신앙과 매우 밀접한 관련이 있다[3]. 한반도 남부 지역 1~6세기의 고대 연합 왕국인 가야 문화권의 고분에서 적색 안료가 발굴되었다는 보고가 있었고, 이 안료들은 용기에 담겨 있거나, 석실 벽면, 벽화, 시신, 토기유물 등에 칠해져 있는 형태로 출토되었다[1]. 이전에는 원소 및

광물상 분석을 통해 원료와 조합을 식별하여 산화철 기반과 진사(cinnabar, HgS) 기반의 붉은 안료들을 구별했었다[16-18]. 그러나 산화철 기반 안료의 경우, 단순히 “고순도 또는 저순도 산화철 안료” 정도만 지칭되어 왔고, D. H. Moon 등이 수행한 연구를 통해 비로서 특정 산화철의 상(phase) 분석과, 결정 크기, 이물질 치환, 그리고 다른 미세립 광물 입자와의 긴밀한 결합의 특징을 연구하게 되었다[1].

특히, ^{57}Fe 의 감마선공명 현상을 이용하는 피스바우어 분광법은 철(Fe)의 화합물 상과 비정질 여부 및 초자성 나노입자 산화철을 구별하고 형성 메커니즘으로 인한 자기적 거동을 분석할 수 있다. 또한, 피스바우어 분석 파라미터들은 천연물에서 철을 함유하는 광물상의 식별과 열처리 등을 거쳐 자성변화나 상변태가 발생한 인공물의 구분 등 매우 유용한 정보를 제공할 수 있었다[14-20]. 이러한 맥락에서 D. H. Moon 외 연구진들이 수행한 연구결과도 경상남도 함안, 김해, 함천에 위치한 네 군데의 가야 유적지에서 발굴된 네 개 샘플들의 광물조성, 특히 각 산화철상의 자성적 특성을 규명하여, 천연 광물을 그대로 사용했는지, 열처리 등을 통해 인공 철 화합물로 변환되었는지를 평가하였고 이는 가야 고분군 적색안료 연구에서 철 산화물 안료에 대한 체계적 분석 수행의 첫 시도였다[1]. 본 연구에서는 이 결과들로부터 문화유산 보존과 복원 분야에 시사하는 바를 요약하고, 각 분석 기법의 결과를 재차 정리하면서 대조군으로 측정한 조선시대 적색 단청 안료의 소재인 울릉도 태하리에 소재한 황토구미의 분석 결과와 비교하고자한다. 이를 기반으로 사용된 분석법들이 향후 문화유산 진단에 적용될 수 있는지를 가늠해 보며, 아울러 피스바우어 분광법으로 철산화물 기반 천연 안료의 열처리 여부를 유추할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

II. 고고학적 배경 및 유물표본

본 연구는 가야 문화권에 속하는 함안, 김해, 함천 지역의 네 개 고분군에서 출토된 적색 안료 시료를 분석 대상으로 삼았다. 가야는 한반도 남부 경상도 일대에 분포한 고대 연



Fig. 1. (Color online) Location and tomb numbers of the pigment collection sites [1].

Table I. The collection site, period, compound, coloring position and reference.

Tomb	Period	Compound	Coloring Position	Reference
Goa-dong, Goryeong	Mid 6C	HgS	Mural	H. S. Lee et al. 2014 Ref. [23]
Tomb No. 36 of tumuli in Jukgokri, Gimhae	5C	HgS	Mural or artifacts (textile)	E. K. Kim 2012 Ref. [3]
Tomb No. 11 of tumuli in Daeseoun-dong, Gimhae	2~6C	HgS	Artifacts (shield)	E. H. Jung and B. C. An 1999 Ref. [24]
Tomb No.6-7 of tumuli in Songhyeon-dong, Changyeong	Late 5C	Fe ₂ O ₃	Mural	GNRICH 2011 Ref. [3]
Tomb No.11 of tumuli in Gyo-dong, Changyeong	6C	Fe ₂ O ₃	Artifacts (textile)	E. H. Jang and B. C. An 1999 Ref. [24]

맹체로, 『삼국유사』에 언급된 6가야 외에도 최소 10개 이상의 독립된 정치 세력이 존재했던 것으로 추정된다. 분석 대상이 된 안료 시료는 다음과 같다:

- #1: 함안 남문외 고분군 No. 6
- #2: 함안 말이산 고분군 No. 13
- #3: 김해 원지리 고분군 No. M4
- #4: 함천 옥천 고분군 No. M3

김해 지역(#3)은 초기 가야 연맹의 중심인 가락국에 해당하며, 함안 지역(#1, #2)은 아라가야, 함천 지역(#4)은 다라국에 대응된다. 여기에 추가로, 비화가야에 속하는 창녕 지역의 교동 및 송현동 고분군 No. 63에서 채취된 안료(#5)도 비교 대상으로 포함하였다. Fig. 1에 해당 고분군들의 위치가 도시되어 있다[1]. 각 고분군에서 출토된 안료에 대한 이전 연구 결과를 Table I에 제시하였다. 적색 안료의 발색은 철 산화물 외에도 주사(진사) 등에 의해서도 가능하다[21-24]. 그러나 D. H. Moon 등 연구진이 보고한 네 군데 고분군에서 발굴한 적색 안료 들은 대부분 철산화물이 이용된 것을 확인할 수 있다.

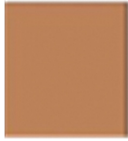
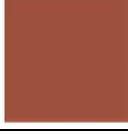
III. 결과 및 고찰

1. 색도 및 결정상 분석 결과

D. H. Moon 외 연구진은 ColorSpec 광도계(S60, X-rite, USA)를 이용하여 가야 고분군에서 출토된 적색 안료의 색도를 측정하였다. 측정된 색도는 국제클레이위원회(CIE)에서 제안한 색 공간을 기준으로 하였으며, L는 명도, a*는 적색, b*는 황색을 나타낸다. 분석 결과, 각 샘플의 색도 값은 서로 다른 특성을 보였다. 이 결과는 Table II에 제시된 바와 같으며, 이들 값을 합친 색도(visualized hue)로 #1과 #5의 경우 붉은-주황색(reddish-orange)로 유사도가 높음을 확인할 수 있다[1].

XRD 측정결과에서 샘플 #1과 #2에서 석영(quartz), 운모(mica), 사장석(feldspar), 고령토(kaolin)의 주 회절선 외에 미량의 적철석(hematite, α -Fe₂O₃) 상을 확인하였고, #3에서는 석영과 적철석의 주 회절선과 함께 미량의 운모와 사장석의 회절선을 확인하였다. #4에서는 순수한 적철석의 회절선을 확인하였다. #5의 샘플은 #1과 #2와 유사한 패턴을 가지나 사

Table II. Values of L*-a*-b*, and visualized hue for samples [1,2].

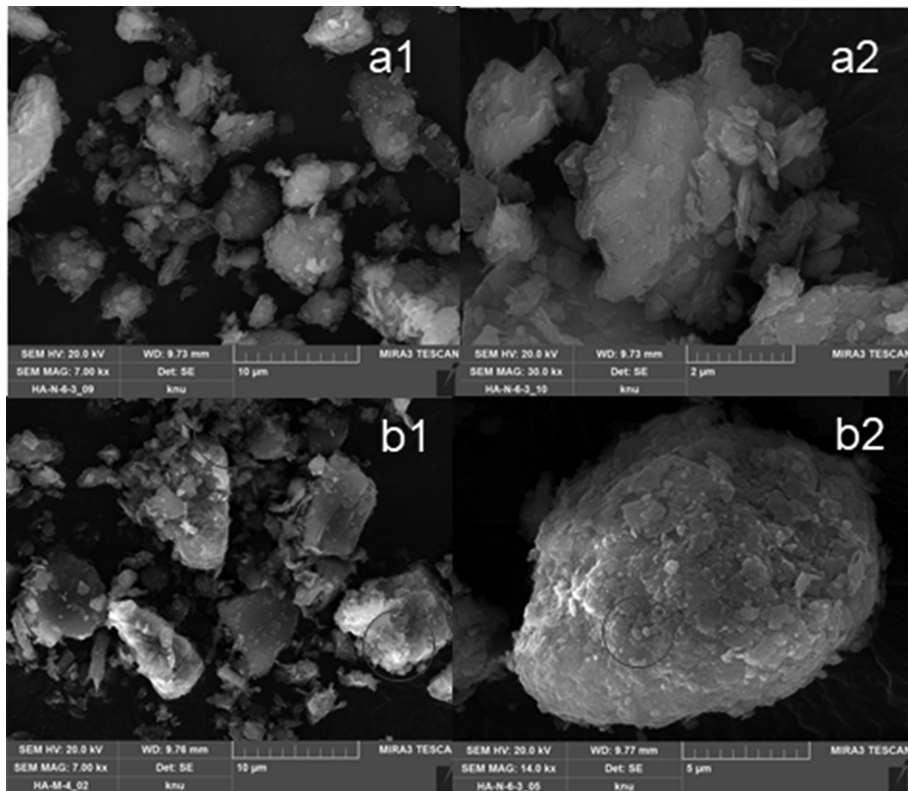
Samples	L*-a*-b*	Visualized Hue	Reference
#1	60.3-18.8-30.3		Moon et al. 2023 Ref. [1]
#2	48.8-9.9-15		Moon et al. 2023 Ref. [1]
#3	44.1-28.6-26.1		Moon et al. 2023 Ref. [1]
#4	39.9-29.5-20.2		Moon et al. 2023 Ref. [1]
#5	50.55-15.07-24.86		-

장석 등의 함량이 매우 적고 고령토 등이 확인되지 않았다[1].

라만 분광 분석에서는 결정성 차이가 명확히 드러났다. 샘플 #1은 적철석이 검출되지 않았고 #2는 브로드한 선폭의 적철석 피크가 나타났다, #3과 #4는 날카로운 선폭의 적철석 피크만 나타나는 결과를 얻었는데 이는 샘플 #3과 #4에 결정질의 적철석이 존재하기 때문이다. 샘플 #1은 적철석이 없고 #2는 미세한 크기의 결정질 적철석 피크가 증가하는 것으로 결론 지어졌다[1].

2. SEM-EDS 분석 결과

주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)과 에너지 분산형 분광 분석(energy dispersive spectroscopy, EDS)을 통해 각 안료 입자의 형태와 원소 분포를 조사하였다. 샘플 #1과 #2는 불균일한 입자 분포를 가지며, 판상 결정형을 포함한 다면체 입자와 이들의 표면을 덮는 나노 크기의 입자가 공존하는 양상이 확인되었다. #3은 판상 입자 사이에 둥근 형태의 나노 다면체 입자가 고르게 분포하고 있으며, 이는 다양한 광물상의 혼합 구조로 해석된다. #4는 비교적 구형도가 높은 나노 크기의 다면체 입자만으로 구성되어 있었다. EDS 분석 결과, 샘플 #1과 #2의 철 성분은 실리카(Si) 및 알루미늄(Al)보다 작고, 규산염 입자 위에 분산된 형태로 존재하며, 대규모 응집체는 형성되지 않았다. 반면, #3과 #4

**Fig. 2.** SEM images for (a1~a2) of sample #1, and (b1~b2) of sample #2.

에서는 산화철 입자 간의 응집이 확인되었으며, 이는 열처리
에 따른 미세입자 성장 및 결정화의 결과로 해석된다.

D. H. Moon 외 연구진들의 결과에서 #1, #3, #4 샘플들
의 결과가 명확한 반면 #2의 주사전자 현미경 결과가 분명하
지 못하여 전 시편들에 대해 주사전자현미경(Axio Imager
A2, Zeiss, Germany) 측정을 추가로 수행하였다. #3의 경우,
이러한 판상 입자들 사이에 둥근 형태의 다면체 나노입자가
고르게 분포하는 것이 관찰 되었으며, 판상결정의 광물 입자
가 혼합된 것으로 나타났다. #4는 나노 크기의 둥근 모양의
다면체 입자만 가지고 있고, #3보다 입자 크기와 구형도가 현
저히 높다. #1은 광물상으로 보이는 판상형 입자들이 주로 관
찰되었다. #2 샘플은 패턴이 #1과 유사하지만, 동그라미로 표
시된 구역들에서 일부 둥근모양의 나노입자들이 광물상들 사
이에 응집되어 존재하는 것이 관찰되었다. 이는 적철석을 포
함한 황토가 열처리되었음을 시사한다. 이와 대조적으로, #3
과 #4는 구형의 다면체 입자들간의 응집을 확인할 수 있었다.
E. Castagnotto 외 연구진들이 보고한 보라색 적철석 안료 연
구에서 열 처리시 적철석이 둥근 다면체 형태를 가지는 응집
체로 분포하는 것을 확인하였다[25]. 샘플 #1과 #2의 SEM결
과와 샘플 #3과 #4의 SEM 결과를 각각 Fig. 2와 Fig. 3에
제시하였다.

3. Mössbauer 분광 분석 결과

철 화합물 분석은 실온(295 K)에서 수집한 뫼스바우어 스
펙트럼을 통해 얻었으며, 뫼스바우어 매개변수는 Table III에
요약하였다. 뫼스바우어 스펙트럼은 각각 여러 개의 하위 스
펙트럼으로 구성되어 있으며, 서로 겹쳐져 최소 두 개의 철
함유 상이 존재함을 보여주는데 #1의 스펙트럼은 세 개의 이
중주선(doublet)이 존재하는 상자성 거동을 보여주는데 D2는
고령토, D3는 점토광물(clay mineral)에 포함된 Fe^{3+} 로, D1은
초상자성의 철산화물 Fe_2O_3 로 분석되었다. 2개 세트의 육중주
선(sixtet) S1과 S2는 자철석(magnetite, Fe_3O_4)으로 해석되었
다[25-30]. #2는 네 개의 이중주선(D1, D4, D5 및 D6)과
단일 육중주선(S3)로 분석되었는데 D1이 초상자성 산화철의
 Fe^{3+} 에 해당하고 D4, D5 및 D6이 녹니석(clinocllore) 그룹
광물의 상자성 Fe^{2+} 및 Fe^{3+} 로 해석되었다[30,31]. 또한, S3는
적철석으로 확인되었다[27,29,34]. #3은 적철석이 풍부한 적갈
색 안료로 뫼스바우어 분광은 약강자성(weak-ferromagnetic)에
해당하는 비교적 날카로운 선을 가진 육중주선과 상자성 산
화철과 미량의 규산염(또는 피타이트로) 추정되는 중앙 이중
주선(D7)의 함으로 분석되었다[30-33]. 날카로운 선폭을 가진
단일 육중주선으로 구성된 샘플 #4는 약강자성(weak-
ferromagnetic)의 적철석에 해당하는 분석 결과가 나왔다. 샘

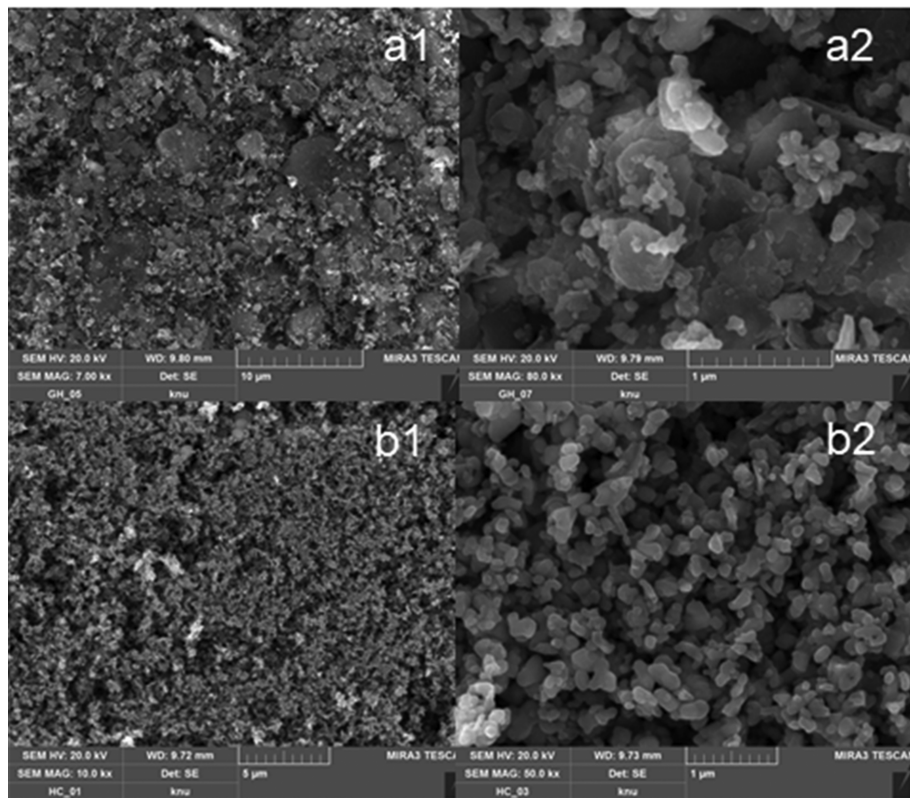


Fig. 3. SEM images for (a1~a2) of sample #3, and (b1~b2) of sample #4.

Table III. Results of Mössbauer spectra for samples of #1, #2, #3, #4, #5, UT, UT-800 and Reference Material [1,32,34].

Sample	Type	H _{hf} (kOe)	IS (mm/s)	QS (mm/s)	Area (%)	Attributions
#1 Aragaya Ref. [1]	D1	-	0.35	0.80	21.40	Fe ³⁺ (super-paramagnetic Fe ₂ O ₃)
	D2	-	0.35	0.45	28.60	Fe ³⁺ (kaolin)
	D3	-	0.38	1.77	21.40	Fe ³⁺ (clay mineral)
	S1	500.0	0.31	-0.07	14.30	Fe ₃ O ₄ (A site)
	S2	456.4	0.50	0.10	14.30	Fe ₃ O ₄ (B site)
#2 Aragaya Ref. [1]	D1	-	0.31	0.81	10.50	Fe ³⁺ (super-paramagnetic Fe ₂ O ₃)
	D4	-	1.09	2.75	8.80	Fe ²⁺ (clinocllore)
	D5	-	1.13	2.25	8.80	Fe ²⁺ (clinocllore)
	D6	-	0.31	0.59	17.60	Fe ³⁺ (clinocllore)
	S3	514.2	0.35	-0.22	54.30	α-Fe ₂ O ₃
#3 Garakguk Ref. [1]	D7	-	0.25	0.69	6.20	Fe ³⁺ bearing silicate or goethite
	S3	512.4	0.37	-0.20	93.80	α-Fe ₂ O ₃
#4 Daraguk Ref. [1]	S3	518.2	0.37	-0.22	100.00	α-Fe ₂ O ₃
#5 Bihwagaya	D7	-	0.23	0.62	53.05	Fe ³⁺ bearing silicate or goethite
	D8	-	1.20	2.40	3.35	Fe ²⁺ (chlorite)
	S3	502.2	0.32	-0.10	43.60	α-Fe ₂ O ₃
UT Ref. [34]	S3	503.5	0.36	0.02	13.61	α-Fe ₂ O ₃
	D9	-	0.21	0.69	86.39	ferrihydrite
UT-800 Ref. [34]	S3	516.1	0.26	-0.10	60.37	α-Fe ₂ O ₃
	D9	-	0.18	0.73	39.63	ferrihydrite
Reference Material Ref. [32]	S3	515.4	0.25	-0.10	100.00	Aldrich Co. α-Fe ₂ O ₃

플 #5의 경우 적철석의 육중주선과 상자성 산화철과 관련된 규산염이나 괴타이트(goethite, α-FeOOH)로 추정되는 중앙 이중주선(D7) 그리고 녹니석 그룹 광물(D8, clinocllore)의 상자성 Fe²⁺ 함으로 Table III에 결과를 기재하였다.

한편, 울릉도 서면 태하리에 위치한 석간주(황토구미) 내외 부에 퇴적 된 적색층 시료를 수직 방향으로 세립질 층에서만 채취한 샘플(UT)과 비교하였다[2,3,34]. 화산쇄설층의 색조는 전체적으로 적색 계열이다. 채취한 샘플(UT)과 800°C로 산화 소성한 샘플(UT 800) 결과를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 시료를 800°C로 소성한 결과, 육중주선의 초미세자기장(H_{hf}) 값은 516.1 kOe로 α-Fe₂O₃에 해당하는 값을 나타내었고, 이성질체이동(isomer shift, IS) 값은 0.26 mm/s, 전기사중극자 이동값(electric quadrupole splitting, EQ)은 -0.10 mm/s로 Fe³⁺의 이온 상태로 분석되었다. 중앙의 이중주선(D9)의 IS값은 0.18 mm/s, EQ 값은 0.73 mm/s로 페리하이드라이트(ferrihydrite)나 화산쇄설류에 존재하는 점토광물에 있는 Fe³⁺에 의한 공명 흡수선임을 알 수 있다[34]. 열처리 전 시료의 적철석의 육중주선의 면적비는 13.61%이고, 800°C에서 소성

한 시료는 60.37%로 약 46.80% 증가한다. 그러나 비정질 철산화물(ferrihydrite)인 이중주선의 면적비는 86.39%에서 800°C 소성을 하면 39.63%로 약 46.80% 감소한다. 울릉도 황토구미를 대조군으로 설정한 이유는 안료의 열처리 여부를 뫼스바우어 분광 결과로 유추 할 수 있는지를 확인하기 위해서다. 또한, 적철석 레퍼런스 물질(Aldrich Co.)의 뫼스바우어 파라미터를 Table III에 제시하였다[32]. 레퍼런스 물질로부터 얻은 적철석의 초미세자기장 값은 515.4 kOe로 열처리 시 얻는 적철석의 값과 유사하다. 가야 고분군 안료 5점과 울릉도 황토구미의 열처리 전후의 뫼스바우어 분석 파라미터 값들을 Table III에 모두 나타내었다[1,34].

열처리되었다고 추정되는 안료 소재의 초미세자기장값은 모두 512.0 kOe 이상의 값을 가지는 반면, 열처리를 하지 않은 천연 소재의 적철석의 초미세자기장 값은 500.0 kOe 전후 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 샘플 #5의 경우 502.0 kOe의 초미세자기장 값을 가지는데 이 경우 열처리 흔적을 찾을 수 없다는 최근 학술 발표 결과가 있었다[35]. 색도 분석이 완료된 5개 샘플 중 열처리를 하지 않은 #1과 #5

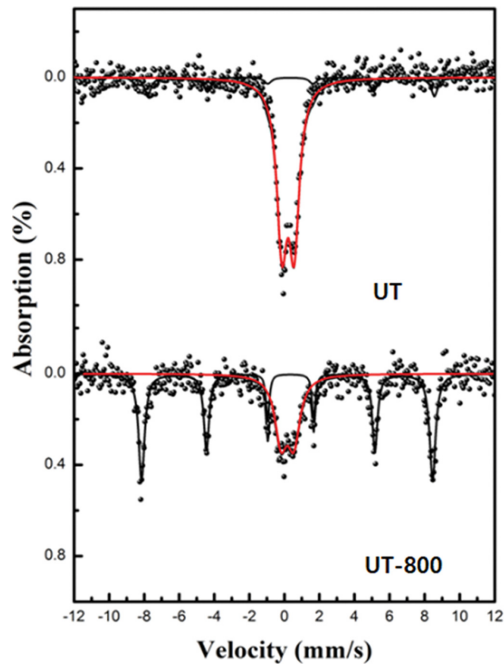


Fig. 4. (Color online) The Mössbauer spectra for samples of UT from the Taehari Hwangtogumi sedimentary layer and for UT-800 from heated UT at 800°C [34].

샘플들의 색도는 명도(L^*)가 다소 높고 적색도(a^*)가 낮은 붉은 주황색이다. #3과 #4의 샘플들은 적색도(a^*)가 증가하고 명도(L^*)가 감소하는 경향을 보여 열처리된 증거를 추가 확보할 수 있었다. #2의 샘플은 명도(L^*)와 적색도(a^*)가 모두 낮다. 그러나 뫼스바우어 분광 결과에서 적철석의 초미세자기장값이 높다는 것에 주목하여 본 연구에서는 주사전자현미경 관찰을 추가적으로 진행하여 광물 사이에 혼재된 구형의 다면체 나노입자들을 확인할 수 있었다. D. H. Moon 외 연구진들은 적철석 나노 입자의 둥근 다면체 형태와 실온 뫼스바우어 스펙트럼으로 #2, #3, #4의 적철석 기반 안료가 의도적으로 열처리된 합성 안료임을 확인할 수 있었는데, 본 연구에서 수행한 #5의 색도 결과와 황토구미의 뫼스바우어 분광 결과도 이를 뒷받침하며, 초미세자기장 값으로부터 열처리 여부를 판별할 수 있음을 확인하였다[34].

열 처리된 적철석 합성과 합성온도 추적 연구는 가공 방법, 열처리 환경 및 기타 여러 변수에 따라 결과가 달라질 수 있다[13,15,36-38]. 특히, 고순도의 철 재료 및 첨가제에 대한 고고학적 문헌 증거가 없이 진행된 연구이기에 D. H. Moon 외 연구진들의 결과와 본 연구에 수행한 대조군 실험은 고대 안료 연구에 유의미한 결과로 볼 수 있다. 특히, 인류 역사에서 열처리 유형의 안료는 19세기 화성 색소(Mars colors)라고 불리는 산화철의 상용 안료가 개발되기 전까지는 거의 보고되지 않았었다[8,13]. 때문에 가야시대 안료의 열처리 기술

은 매우 진보적인 기술로 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 D. H. Moon 외 연구진들이 2023년에 보고한 고대 가야 문화권에서 발견된 네 가지 특징적인 산화철 기반 적색 안료의 원재료와 제조 공정 규명을 해설하고자 하였다. 다중 특성 분석 기법을 이용한 결과, 천연 적색 황토, 열처리 황토, 그리고 적철석 기반 물질과 광물 기반의 페이스트가 혼재된 소재, 그리고 열처리된 순수한 적철석이 안료 제조에 사용되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 고대 가야인들이 목적에 따라 다양한 종류의 산화철 기반 안료를 생산했음을 시사하며, 본 연구를 통해서 이를 뒷받침하는 결정적인 증거를 더 확보할 수 있었다. 산화철 기반 안료의 상세 식별 방법은 뫼스바우어 분광법을 이용하여 정밀도를 높일 수 있고, 초미세자기장 값으로부터 천연물에서 얻은 철산화물 기반 안료의 열처리 여부를 유추할 수 있는 새로운 기법도 적용할 수 있다. 향후 철 화합물 기반 페인트 재료 분석에 활용될 수 있으며, 고대 산화철 기반 안료 제작 과정과 철기 부식물 식별과 생성메카니즘 규명 등에도 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국가유산청 문화유산 R&D 사업(No. RS-2021-NC100301)과 과학기술정보통신부의 한국연구재단(No. NRF-2022R1A2C2092277) 및 한국원자력연구원 정부출연금사업(MSIT 1711078081)으로 수행되었습니다.

References

- [1] D. H. Moon, N. R. Lee, W. R. Han, S. J. Kim, and Y. R. Uhm, *J. Radioanal. & Nucl. Chem.* **332**, 5175 (2023).
- [2] Y. M. Yoo, M. S. Han, and J. J. Lee, *J. Conser. Sci.* **30**, 365 (2014).
- [3] W. R. Han, S. J. Kim, D. H. Moon, and J. Y. Park, *Conserv. Sci. Stud.* **43**, 45 (2022).
- [4] S. W. Mun, Y. S. Kang, J. H. Park, M. S. Han, and H. Y. Jeong, *J. Conser. Sci.* **35**, 600 (2019).
- [5] R. Siddall, *Minerals* **8**, 201 (2018).
- [6] E. K. Kim, *Yongnam Archaeol. Rev. YONGNAM KOGOHAK* **61**, 51 (2012).
- [7] M. Kawano, T. Minami, T. Tateishi, S. Shoda, and S. Imazu, *J. Kor. Field Archaeol.* **21**, 103 (2014).
- [8] D. Hradil, T. Grygar, J. Hradilova, and P. Bezdička, *Appl. Clay Sci.* **22**, 223 (2003).
- [9] L. K. Herrera, M. Cotte, M. C. Jimenez de Haro, A. Duran, A. Justo, J. L. Perez-Rodriguez, *Appl. Clay Sci.* **42**, 57 (2008).

- [10] D. L. Hoffman, D. E. Angelucci, V. Villaverde, J. Zapata, and J. Zilhao, *Sci. Adv.* **4**, 5255 (2018).
- [11] D. L. Hoffman, C. D. Standish, M. García-Diez, P. B. Pettitt, J. A. Milton, J. Zilhão, J. J. Alcolea-González, P. Cantalejo-Duarte, H. Collado, R. de Balbin, M. Lorblanchet, J. Ramos-Muñoz, G.-Ch. Weniger, and A. W. G. Pike, *Science* **359**, 912 (2018).
- [12] M. P. Pomiès, M. Menu, and C. Vignaud, *Archaeometry* **41**, 275 (1999).
- [13] N. Nurdini, M. M. Ilmi, E. Maryanti, P. Setiawan, G. T. M. Kadja, and Ismunandar, *Heliyon* **8**, e10377 (2022).
- [14] A. Lerf, F. E. Wagner, M. Dreher, T. Espejo, and J. L. Perez-Rodriguez, *Herit. Sci.* **9**, 49 (2021).
- [15] A. Tsatskin and T. S. Gendler, *J. Archaeol. Sci. Rep.* **6**, 284 (2016).
- [16] A. A. Novakova, V. O. Denisov, N. M. Boeva, and A. Tsatskin, *Crystallogr. Rep.* **65**, 376 (2020).
- [17] M. H. Lee, M. S. Han, Y. R. Uhm, and C. S. Kim, *Radioanal. Nucl. Chem.* **330**, 529 (2021).
- [18] H. Choi, G.-M. Sun, and Y. R. Uhm, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **332**, 5119 (2023).
- [19] E. Murad *Hyperfine Interact* **47**, 33 (1989).
- [20] H. Choi, M. S. Han, D. H. Moon, C. S. Kim, S. W. Nam and Y. R. Uhm, *Heritage Science* **12**, 236 (2024).
- [21] J. Kim, H. K. Cho, B. K. Jun, N. C. Cho, and C. H. Lee, *J. Conser. Sci.* **27**, 31 (2011).
- [22] J. H. Park and H. Y. Jeong, *J. Minr. Soc. Kor.* **32**, 259 (2019).
- [23] H. S. Lee, H. H. Lee, K. M. Lee, and K. S. Han, *J. Conserv. Sci.* **30**, 457 (2014).
- [24] E. H. Jang and B. C. Ahn, *Conserv. Sci. Muesum* **1**, 87 (1999).
- [25] E. Castagnotto, F. Locardi, S. Slimani, D. Peddis, L. Gaggero, and M. Ferretti, *Dye. Pig.* **185**, 108881 (2021).
- [26] X. Cao, R. Prozorov, Y. Koltypin, G. Kataby, I. Felner, A. and Gedanken, *J. Mter. Res.* **12**, 402 (1997).
- [27] M. Mashlan, R. Zboril, L. Machala, M. Vujtek, J. Walla, K. Nomura, and J. Metastab. *Nanocryst. Mater.* **20-21**, 641 (2004).
- [28] E. Murad and J. D. Fabris, *J. Phys. Conf. Ser.* **217**, 012066 (2010).
- [29] L. Theil Kuhn, K. Lefmann, C. R. H. Bahl, S. Nyborg Ancona, P.-A. Lindgård, C. Frandsen, D. E. Madsen, and S. Mørup, *Phys. Rev. B* **74**, 184406 (2006).
- [30] H. Kodama, G. Longworth, and M. G. Townsend, *Can. Mineral.* **20**, 585 (1982).
- [31] F. Bodker, M. F. Hansen, C. B. Koch, K. Lefmann, and S. Morup, *Phys. Rev. B* **61**, 6826 (2000).
- [32] H. Choi, M. S. Han, N.-C. Cho, H. Hwang, G. M. Sun, and Y. R. Uhm, *Scientific Reports* **15**, 10207 (2025).
- [33] L. Heller-Kallai and I. Rozenson, *Phys. Chem. Miner.* **7**, 223 (1981).
- [34] J. J. Lee, Ph.D Thesis, A study on mineralogical characteristics and phytolith of natural pigment Seokganju in Ulleungdo, Chonnam National University, Korea (2015).
- [35] W. R. Han, J. H. Kwon, J. Y. Park, and S. J. Kim, Study on the Construction Process and Funerary Rites of Ancient Tombs through Pigment Analysis of Tombs No. 39 and 63 at Gyo-dong and Songhyeon-dong, Changnyeong, *Proc. of Spring Meeting of Kor. Soc. Conser. Sci. Cul. Heri.* (2025) pp. 2.
- [36] D. E. Fouad, C. Zhang, H. El-Didamony, L. Yingnan, T. D. Mekuria, and A. H. Shah, *Results Phys* **12**, 1253 (2019).
- [37] D. L. A. De Faria, S. Venancio Silva, and M. T. De Oliveira J. *Raman. Spectrosc.* **28**, 873 (1997).
- [38] N. E. Fouad, H. M. Ismail, and M. I. Zaki, *J. Mater. Sci. Lett.* **17**, 27 (1998).