

고구려 벽화무덤의 보존을 위한 마감층(화지층) 물감 연구

- 쌍기둥무덤의 Ca 성분 물감을 중심으로 -

Study on the Coating Material Used in the Mural Paintings of Goguryeo Tombs

- Focusing on the Ca-based Ingredients Found in the Twin Column Tomb -

채 미 영

목 차

I. 서론

1. 선행연구
2. 연구 목적 및 연구 방법

II. 시험편의 재료선정

1. 골조(骨組)와 바탕석재
2. 마감층(화지층) 안료 선정
3. 전색제(展色劑, midium) 선정
 - 1) 아교 사용의 근거자료
 - 2) 아교 실험자료(개가죽아교수)
 - 3) 들기름(乾性油)의 문헌사적 근거
4. 보조제의 문헌사적 근거

III. 시험편 제작과 채색특성

1. 시험편 제작
2. 채색 후 특성
 - 1) 백색도 2) 단면구조 3) 표면구조 4) 무게변화
3. 인공풍화 후 특성

IV. 고찰

V. 결론

= 국문초록 =

지금까지 과학적 방법으로 밝혀진 11 기 고구려 벽화무덤 마감층(화지층)의 주성분은 칼슘으로 알려져 있다. 칼슘 성분을 포함한 무기물들은 대부분 백색이므로 마감층은 물론 채색층의 백색안료로도 사용될 수 있는 물질이다. 자연계에서 칼슘성분이 포함된 물질 중 벽화의 마감층에 사용될 수 있는 물질은 모두 8 종류가 있다. 그러나 고구려 벽화 전문가 양성교육을 하고 있는 일본을 비롯한 유네스코(UNESCO)에서도 칼슘 성분물질을 한 종류로 다루고 있다. 쌍기둥무덤 벽화조각을 조사 분석했던 국내외의 선행연구자들도 동일한 연구대상임에도 연구자에 따라 칼슘성분 물질을 다르게 표현하고 있다. 즉, 마감층과 밀칠층 및 채색층의 백색 쓰임이 분명하게 구분되지 않아 벽화를 보존처리 하거나 복원하려 할 때 선행연구의 자료로는 불충분할 수 있다.

본 연구는 이러한 점에 착안하여 쌍기둥무덤의 마감층에 대해 다음의 내용들을 분명히 하고자 하였다. 첫 째, 쌍기둥무덤 마감층에 사용한 Ca 성분 물질은 무엇인가 둘 째, 마감층 물감에 사용된 전색제와 보조제는 무엇인가 셋 째, 벽화 보존의 비밀(秘密) 중 하나인 바탕석재와 마감층의 물리 화학적 결합관계는 어떠한가. 넷 째, 무덤 내의 환경과 동일한 조건으로 인공풍화 시켰을 때와 쌍기둥무덤에서 조사 분석 결과를 비교하여 탄산칼슘 층 형성에 대한 현상을 조사하고자 한다.

= 주제어 =

마감층(Ca 성분), 소석회[Ca(OH)₂], 합분(호분), 개가죽아교수, 알카리, 산.

I. 서론

고구려 벽화의 제작기법이나 표현기법은 동양의 예술정신과 전통회화를 비롯하여 궁궐건축이나 사찰건축의 단청 및 공예기법들을 직접 익혀 제작해 본 오랜 경험에

의하지 않고는 결코 느낄 수 없는 실제(實際) 문제에 당면해 있다. 일본에서는 1980년대 초 돈황 석굴벽화 보존처리를 기점으로 아시아 전역의 문화재에 막대한 기금을 부담하면서 단절된 제작기법과 표현기법 및 전통기술의 복원에 관한 문제를 해결하려 하였다. 이것은 국제문화재보존 및 복원연구센터(International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property, 이하 ICCROM이라 함)에서도 심혈을 기울이고 있는 중요한 사업이기도 하다.

돈황석굴벽화 보존처리 이후 일본에서는 이론(理論) 못지않게 실제(實際)의 적용도 중요하다는 생각을 가지고 《화제(畫題)와 소재(素材)의 서랍 박물관》을 먼저 개관하기에 이르렀으며, 관련 연구자는 물론 일반 신청인들까지 정기적인 교육을 실시하게 되었다. 이후 이론과 실제의 유기적인 연계 연구의 필요성이 절실하다는 판단에 따라 일본에서는 서둘러 문화재 관련학과를 대학에 개설하게 되었다. 지금은 그 교육 세대들이 다수 배출되어 활발한 활동을 하기에 이르렀다. 이러한 과정은 유네스코(UNESCO) 휘하 고구려 벽화 전문가 양성교육이 일본에서 자연스럽게 이루어졌고, 지금은 조사대상 벽화무덤의 자연과학적 분석 내용으로 전통 채색물감의 전색제(고착제) 연구에 박차를 가하고 있는 실정이다.

1. 선행연구

자연과학적인 방법으로 고구려 벽화무덤의 안료와 관련된 최초의 논문은 1989년 존 윈터에 의해서 이루어졌다. 존 윈터는 고구려의 쌍기둥무덤 벽화조각에 보이는 마감층의 백색과 흑색안료를 조사하였고, 백제와 고신라 및 통일신라시대에 이르는 채색유물조각 편에 보이는 고대 안료들을 조사 분석하였다. 또 이상수 · 안병찬은 1998년 중국 집안지역에 위치한 통구 12호무덤과 출토지미상의 벽화조각, 그리고 쌍기둥무덤 벽화조각에 대한 재조사 분석이 있었다. 1998년 이상수 · 안병찬의 “「고구려 벽화 제작기법시고」”와 2000년 채미영의 “고구려 석회 모르타르 바탕재 연구”로 벽화 마감층의 중요성을 더욱 인식하게 되었다. 이에 <고구려 연구회>에서는 무너져버린 잔해더미에서 집안지역 벽화무덤인 하해방 31호무덤에서 벽화잔편을 수거하였다. 이 벽화조각은 광물 성분, 첨가제, 강도 측정, 함수율 측정, 안료 따위를 조사하여 석회의 특성과 가공기술, 제조 방법, 시공 기술 따위가 보고되었다. 2004년에는 고구려 벽화무덤이 세계문화유산에

등재되면서 평양지역의 덕흥리 벽화무덤과 약수리 벽화무덤이 ICCROM 의 보고서로 조사된 바가 있다. 이 보고서에서는 석회의 가공기술의 뛰어난을 언급하였고, 학계의 논란이 되고 있는 습식벽화(서양 : 프레스코화)의 가능성을 밝히고 있다. 또 2005 년 유혜선에 의해서 보다 개선된 방법으로 재조사되어 쌍기둥무덤의 벽화조각은 모두 3 편의 논문으로 발표되어 있다. 또 2006 년 고구려 벽화 제작기법과 관련된 문헌을 통해서 가장 근접하는 석회 모르타르 시편을 직접 제작하여 단면조사, 함수율, 쇼오경도기 시험기를 이용한 경도 측정, XRD 를 이용한 광물 분석, SEM-EDS 를 이용한 조직 및 화학 성분 분석 따위를 실험한 예가 있다. 2004 년 고구려 벽화무덤이 세계문화유산에 등재된 후 2006~2007 년에 남북한공동조사가 있었다. 따라서 국내에서 현재까지 고구려 벽화 마감층과 채색층의 안료가 자연과학적으로 조사 분석된 예는 쌍기둥무덤 . 통구 12 호무덤 . 출토지미상무덤의 벽화조각(하해방 31 호무덤)과 안악 3 호무덤 . 덕흥리무덤 . 수산리무덤 . 진파리 1 호무덤 . 진파리 4 호무덤 . 호남리사신무덤 . 강서대무덤 . 강서중무덤들이 있어 총 11 기에 이른다.

2. 연구 목적 및 연구 방법

본 연구는 마감층 연구에 있어서 특별히 쌍기둥무덤의 조사 분석 내용에 근거하였다. 그 이유는 첫째, 쌍기둥무덤 벽화조각은 자연과학적인 조사 방법으로 각기 다른 연구자들에 의해서 3 편의 논문으로 발표되어 서로 비교해 볼 수 있다. 둘째, 쌍기둥무덤 벽화조각은 현재 국립중앙박물관에 소장되어 있어서 충분한 시간을 두고 조사했으므로 일회성 조사와는 달리 정확하고 정밀한 조사가 이루어졌을 것이다. 셋째, 쌍기둥무덤은 5 세기 후반으로 편년되고 인물풍속도 및 사신도가 그려져 있어 석회 모르타르 바탕재에서 석재 바탕재로 전환되는 단계의 습합과정에 있는 벽화무덤 중 하나이다. 바탕재의 습합과정은 벽화의 제작기법이나 사용된 재료의 차이를 나타내는 시기이기 때문에 쌍기둥무덤이 벽화 제작기법사에서 의미가 있다고 판단하였다. 넷째, 쌍기둥무덤의 벽화조각은 서벽 널길의 것이어서 안료의 성분 검출이 다른 벽화에서 조사된 내용에 비해 복잡하지

않다. 채색층에서 검출된 안료의 성분이 복잡할수록 색채 복원은 그만큼 더 복잡해지기 때문에 연구 대상으로 하였다.

그동안 고구려 후기 벽화는 아무런 처리 없이 석재바탕에 직접 채색한 것으로 알려져 왔다. 그러나 바탕석재에 마감칠이나 연백으로 밀칠이 되어있지 않으면 채색이 잘 되지 않고 벽화가 지금까지 남아있을 수 없다. 그러므로 고구려 벽화의 색채는 매개물질로 단순히 ‘붓으로 칠하여 고착시킨다.’는 개념이 아니다. 채색물질의 성분은 물론 바탕석재와 마감층, 연백층과 마감층, 마감층과 채색층의 물리 화학적인 결합관계를 반드시 고려하여야 벽화의 색채를 이해할 수 있다. 그 중 고구려 벽화의 색채를 이해하기 위해서는 바탕석재와 마감층(화지층 : Ca 성분)의 결합관계가 최우선적으로 연구되어야 한다. 그것은 바탕석재와 마감층을 잘 결합시켜야만 그 다음 단계로 색을 칠할 수 있는 안정화 상태가 될 수 있기 때문이다.

지금까지 국내에서 조사한 11 기의 고구려 벽화 마감층 중 대다수에서 칼슘성분이 검출되었다. 자연계에서 칼슘성분을 포함한 물질은 8 종류가 있다. 또 벽화에서 검출된 성분 중 칼슘성분 물질을 구분해야만 벽화의 마감층과 채색층을 이해하거나 복원하는데 필요한 정확한 자료를 제공할 수 있다. 특히 칼슘 성분은 물리 화학적으로 변화가 큰 물질이라 노화된 벽화에 급격한 영향을 미치게 되므로 추정되는 원 재료를 가지고 물성을 파악하는 것이 반드시 필요하다. 따라서 국내외 선행연구 자료로는 불충분할 수 있다.

채색물질은 전색제에 따라 물질의 종류가 결정된다. 1980 년대 일본에서 돈황석굴벽화 보존처리 이후 유네스코(UNESCO)에 막대한 기금을 감당하면서 전통 채색물질의 종류에 대한 정확한 근거를 찾기 위해 노력해 왔다. 그러나 첨단과학 기기(機器)를 이용한 조사에서도 전색제 성분을 확정하지 못한 실정이다. 이런 점에서 본 연구는 가설을 통한 시험편 제작으로 바탕석재와 마감층에 사용된 재료를 밝히고, 이를 통해 벽화를 보존처리 하거나 복원을 위한 정보를 제공하는 데 있다. 이를 위해 다음과 같은 내용을 연구하게 되었다. 첫 째, 쌍기둥무덤 마감층에 사용한 Ca 성분 물질은 무엇인가 둘 째, 마감층 물질에 사용된 전색제와 보조제는 무엇인가 셋 째, 벽화 보존의 비밀(秘密) 중 하나인 바탕석재와 마감층의 물리 화학적 결합관계는 어떠한가. 넷 째, 무덤 내의 환경과 동일한 조건으로

인공풍화 시켰을 때와 쌍기둥무덤에서 조사 분석된 결과를 비교하여 탄산칼슘 층 형성에 대한 현상을 조사하고자 한다.

고구려 벽화에 사용된 재료들은 자연과학적 근거자료와 문헌사적인 연구 및 가능한 실험제작들을 유기적으로 종합하지 않으면 찾아낼 수 없다. 뿐만 아니라 시험편의 제작 크기는 제한된 크기이므로 전통회화를 전공했던 경험과 밝혀진 사실을 바탕으로 실제 제작해보는 것은 벽화 제작기법을 이해하고 미술창작 활동에도 큰 도움이 된다. 실험제작을 하기 위한 연구 조건과 방법은 다음과 같다.

첫째, 채색물감은 [안료 + 전색제 + 보조제] 성분으로 제조한다.

둘째, 물감 배합비율에 따라 각각 3 개 씩 제작하고 채색상태가 양호한 것에서부터 은폐력이 떨어진 상태까지 시험편을 모두 제작한다.

셋째, 인공풍화 전, 후의 시험편을 촬영하여 Color Chart(Kodark) 색상을 비교하였다. 단면과 표면구조는 휴대용 실체현미경(Digital Microscopy, Scalar, Co, Japan.)으로 측정하였다. 소식회는 2009년 10월 7일부터 수화시켜 사용하였으며, 시험편은 2010년 7월 19일~8월 9일 모두 제작하였다. 인공풍화는 고구려 벽화무덤과 동일한 환경조건에서 8월 12일부터 시작하였으며, 휴식기를 뺀 23일 동안 실시하였다. 또한, 마감층 표면의 탄산칼슘 층 형성 유무는 X 선회절분석기(XRD)를 이용하여 측정하였으며 제작된 마감층 시험편의 백색도를 수치화하기 위한 색상변화는 KURABO Color-7X로 측정하였다.

II. 시험편 재료선정

1. 골조(骨組)와 바탕석재

고구려 벽화무덤의 바탕재는 크게 전기의 석회 모르타르 바탕재와 후기의 석재 바탕재로 나눌 수 있다. 《발굴보고서》와 지금까지 언급되고 있는 석재 골조(骨組)나 바탕석재에 관한 내용들을 정리해 보면 다음과 같은 특성을 보인다. 처음에는 작은 크기에서부터 시작하지만 후대로 갈수록 석재의 크기가 점점 커진다.(주요 벽면벽화 기준) 또 하나의 특징은 벽화무덤에 내재된 원리가 있어 석재 크기가 대체로 ‘크고 작은’ (석회 모르타르 바탕재의 골조), 또는 ‘홀수와

‘작수’의 석재 숫자(석재 바탕재)로 짝을 이루는 형태를 취하며 변화를 추구하여 무덤 내의 석재 크기는 하나같이 동일하지 않다.

위 내용을 좀 더 확대해서 살펴보면 대체로 ①일정한 크기의 깬 돌 → ② 크고 작은 깬 돌 → ③크고 작은 막돌 → ④전돌 크기의 석재 → ⑤블럭 크기의 장방형 정방형 석재 → ⑥석회 이음새가 있는 장방형 정방형 대형 석재 → ⑦석회 이음새 없는 장방형 정방형 대형 석재(예 : 강서대무덤)로 그 크기가 점점 커지면서 석재를 다루는 기술도 치밀하게 발전한다. 이러한 양상은 시대 변천에 따라 달라지는 것이어서 매우 특징적인 것으로 볼 수 있다. 이러한 특징은 벽화무덤의 숫자가 적은 집안지역에서 비교적 잘 드러나고 있다. <표 1>

<표 1> 골조와 바탕석재의 크기 변화(집안지역 : 주요 벽면벽화 기준)

뼈조의 크기와 모양				석재의 크기와 모양		
일정한 크기 깬 돌	크고 작은 깬 돌	크고 작은 막돌	전돌 크기의 석재	블럭 크기의 장방형 정방형 석재	석회 이음새가 있는 대형 석재	석회 이음새가 없는 대형 석재(평양지역 경우)
모두루무덤	통구 12 호무덤 장천 4 호무덤	하해방 31 호무덤 씨름무덤 앞방(현장조사) 산성하 332 호무덤	안악 3 호무덤 앞방(평양지역)	씨름무덤 닐방(현장조사) 삼실무덤 미창구장군무덤	통구사신무덤 다섯무덤 4 호무덤(북벽 6 매, 동벽과 서벽 5 매) 다섯무덤 5 호무덤(현장조사 : 북벽 2 매, 동벽과 서벽 3 매) 산성하절천정무덤	강서중무덤 강서대무덤(북벽 1 매, 동벽과 서벽 2 매)

중국 측에서는 집안지역 석재 바탕재 벽화무덤 암석의 종(種)을 대다수 화강암으로 보고 있다. 화강석의 특징은 다이아몬드 다음으로 강도가 크고 질(質)이 단단하여 내구성이 매우 뛰어나다. 또 절리가 잘 발달하여 대형 석재를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하중에 의한 상하 무덤구조의 구축재로도 화강암은 매우 뛰어나므로 고구려 벽화무덤에 가장 많이 사용되었을 것으로 추정되는 암석재이다.

암석의 종류에 따라 흡수율에는 차이가 있지만 흡유율에는 차이가 거의 없는 것으로 조사되었다. 고구려 벽화무덤에 사용된 주 암석재는 지질학적인 입지조건상

주로 화강암과 석회암으로 추정되지만 의외로 다른 암석제도 다수 조사되었다. 실험한 암석들의 흡수율은 <표 2>에서 볼 수 있는 것처럼 안산암→사암→석회암→화강암 순으로 낮다. 고구려 벽화무덤이나 한국 석조문화재에 화강암이 많이 사용된 것은 흡수율을 줄이기 위한 것임을 알 수 있다. 이에 비해 흡유율은 안산암 . 사암 . 석회암 . 화강암 모두 들기름에 흡션 배는 것이 특징이다. 특히 화강암은 흡유율이 좋으면서 건조속도까지 빠른 것으로 조사되었다.

정다듬 잔다듬을 한 거창 화강석은 물의 흡수율과 기름의 흡유율이 매우 좋다. 특히 정다듬 잔다듬을 한 석재바탕의 흡수율은 매우 양호하다. 석재 면을 유리처럼 매끈하게 물갈기 한 다음 마감칠을 해 보았다. 이때는 물감이 전혀 스며들지 못하고 표면에서 물감이 표면장력에 의해 물방울처럼 맺히는 현상을 보인다. 이에 비해 정다듬을 한 거창 화강석의 흡유율은 바닥에 깔아둔 실험용 티슈는 물론 실험대까지 일부 고이는 시험편이 있을 정도로 흡션 배여 나온다. 마찬가지로 석재 면을 유리처럼 매끈하게 물갈기 한 다음 마감칠을 해 보니 물감이 전혀 스며들지 못하고 표면에서 미끄러짐 현상을 보인다. 그러므로 붓이 지나간 물감 흔적만 남는다. 이 실험으로 보아 고구려 후기 석재바탕에 정다듬 잔다듬을 한 이유는 물감의 흡수율과 기름의 흡유율을 높이기 위한 것임을 알 수 있다.

석재바탕의 정다듬 잔다듬에 의한 거칠기에 따라 채색되는 정도도 비교해 보았다. 석재바탕의 거칠기는 조금 거칠게 한 것이나 매우 거칠게 한 것이나 물감의 흡수율과 흡유율에 있어서는 차이가 없었다. 그러나 정다듬 잔다듬에 의한 바탕질감은 큰 차이를 보이고, 광선(光線)에 의한 빛이 있을 경우 음영(陰影)이 붙어 질감의 느낌은 더욱 강해진다.

<표 2> 암석의 종류와 흡수율 . 흡유율

	암 석 명	거친 정도	흡 수 율	흡유율
암석의 종류	사암		13.2	기름에 흡션 뻐다.
	석회암		0.33 ~ 0.5	상동
	안산암		1.83 ~ 3.2	상동
	거창 화강석	가장 거친 것	0.33 ~ 0.5	상동
덜 거친 것				

		조금 거친 것		
--	--	---------	--	--

위와 같은 사실들을 근거로 본 시험편 제작은 국내 석조문화재에 흔히 사용된 흑운모(biotite)가 포함된 거창 화강석을 이용하여 바탕석재로 실험 제작하였다.

2. 마감층(화지층) 안료 선정

칼슘성분을 포함하는 마감칠용 안료는 대부분 탄산염광물[炭酸鹽鑛物, carbonate mineral]이다. 지금까지 고구려 벽화무덤 마감칠용 안료는 생석회, 또는 석회로 인식해 왔다. 그러나 화학성분이 CaCO_3 로 조사된 마감칠용 안료에는 석회암을 소성하여 가공하는 생석회와 수화된 소석회가 있으며, $[\text{CaCO}_3]$ 의 결정구조에 따라서는 방해석(方解石, calcite), 바테라이트(Vaterite), 아라고나이트(aragonite)가 있다. 그 외에도 백운석(dolomite, $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$), 석고(gypsum, $[\text{CaSO}_4]$), 조개껍질을 가공한 합분(호분)들이 있다.

자연에 존재하는 대부분의 산화칼슘염들은 화학반응을 거쳐 CaCO_3 로 변할 수 있다. 또한 광물 내의 결정구조(crystal structure)의 차이는 입자형상 . 입도분포 . 표면적의 크기 . 입자의 충전률 . 광학적 성질 . 평활성 . 내충격성과 같은 물리적, 화학적 성질을 변화시킨다. 그러므로 Ca 칼슘염이 백색안료로 사용되면 전색제의 종류 및 보조제 사용 유무(有無)에 따라 물감의 배합상태 . 바탕석재와 마감층의 결합상태 . 건조시간 . 마감층 두께 . 결정구조 . 은폐력 . 백색도 . 무게... 등에 차이를 보이게 될 것이다.

본 연구에서 사용한 칼슘성분 안료들의 선정 근거는 다음과 같다.

①자연과학적으로 밝혀진 내용 : 쌍기둥무덤과 남북한공동조사를 했던 안병찬은 Ca 성분이 검출된 마감층을 ‘방해석(calcite)’으로 표현하고 있다. 방해석은 재결정에 의한 경질의 탄산칼슘이므로 그 특성이 다르게 나타날 것이다. 이에 대해 유혜선은 ‘석회(calcite & aragonite)’, 곧 ‘대합을 원료로 하여 제조된 아라고나이트’로 보았다. 대합은, 곧 호분을 의미한다. 따라서 ‘방해석’ . ‘석회’ . ‘aragonite’ . ‘대합(호분)’들이 열거되고 있다. 이 중 석회에 관하여 살펴보면 다음과 같다.

②고구려의 지질학적인 자연조건 : 벽화재료는 그 지역에서 가장 많이 나는 재료를 이용하여야 지속적으로 벽화무덤을 축조할 수 있고 잘 다룰 수 있는 전통기술을

계승시킬 수 있다. 고구려 벽화무덤은 400 여 년이나 지속적으로 조성되었고, 벽화무덤이 위치한 집안지역과 평양지역은 둘 다 석회암 지대로 무덤 뼈들이 밀집해 있는 것과 관계가 있다. 이러한 지질학적인 자연조건은 고구려인들의 생활과 떼어 수 없는 밀접한 관계를 맺어왔고 석회석을 가공하는 기술이 일찍부터 발달하게 된 것과 무관하지 않다. 단적인 예로 석회의 단점을 보완하는데 조개껍질 및 호분을 사용한 것으로도 짐작할 수 있다.(보조제 내용 참조)

③안료의 성질 : 석회석으로 가공할 수 있는 마감층 재료는 생석회[CaO]와 소석회[Ca(OH)₂]가 가능하지만 본 실험은 건식벽화로 실험 제작하므로 생석회는 제외된다. 또 바테라이트와 백운석은 석회암이 변화된 것이므로 집안지역과 평양지역의 지질학적인 자연조건이나 400 여 년간이나 벽화무덤이 조성된 사실로 볼 때에 사용되기 어렵다. 또 석고(gypsum, CaSO₄)는 우리나라 주변에서 흔한 재료이지만 다음과 같은 사실 때문에 고구려 벽화무덤에는 사용되지 않았던 것으로 추정된다. 예를 들어 최근 국내 최초로 《소조상안전진단보고서》 양식이 발간되었다. 소조상과 같은 조각상에는 그동안 Ca 성분이라는 사실을 근거로 가장 손쉬운 방법인 석고로 보존처리를 해왔다. 그러나 석고는 처음에는 백색이 양호하나 오래되면 물리 화학적으로 변질(alteration)되어 어둡게 변한다. 이는 석회는 물 분자를 가지고 있음에 비해 석고는 가지고 있지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 황(S) 성분도 Ca 성분처럼 물과 반응하면 이온상태로 해리되어 CaSO₄ · 2H₂O 인 염 용액으로 변화되기 때문이다. 여기서 Ca 성분이 검출되는 고구려 벽화나 문화재에 석고로 보존처리를 해서는 안 된다는 사실을 알 수 있다. 본 연구에서는 방해석 실험까지 겸할 수 없어서 우선 Ca(OH)₂ · aragonite · 호분으로 실험 제작하여 그 결과를 살펴보기로 한다.

이상의 내용을 바탕으로 한 마감층 안료의 재료 선정은 <표 3> 과 같다.

<표 3> 마감층 안료의 종류 및 재료 선정

	종류	화학식	선정 여부
안료의 종류	calcium hydroxide	Ca(OH) ₂	○
	quick lime	CaO	×
	aragonite	CaCO ₃	○

	합분(호분)	CaCO ₃	○
	calcite	CaCO ₃	×
	dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	×
	Vaterite	CaCO ₃	×
	gypsum	CaSO ₄	×

3. 전색제(展色劑, **midium**) 선정

채색물감은 전색제(고착제)에 따라 물감의 종류가 결정된다. 고구려 벽화 색채연구의 문제는 오늘날의 첨단과학 기기로도 사용된 전색제 성분이 검출되지 않는다. 이런 이유로 일본에서 돈황석굴벽화 보존처리 이후 각고(覺苦)의 노력을 펼쳐왔지만 전통색이 정립되지 못했다. 고구려 벽화무덤이 세계문화유산에 등록되자 일본에서 전색제 연구에 박차를 가한 것도 이 때문이다.

1) 아교 사용의 근거자료

고구려와 직접적인 관계가 있는 자료들만 살펴보면 다음과 같다. ①전색제와 관련된 고문헌 중 《呂氏春秋》와 《淮南子》의 기록에 ‘漆 . 아교 . 기름’ 이 보인다. 《呂氏春秋》는 진(秦)의 여불위(呂不韋, ? ~ B.C. 235)와 그의 빈객(賓客)들이, 또 『淮南子』는 유안(劉安, B.C. 179 ~ 122)과 그의 빈객들이 공동 저술한 것으로 알려져 있다. 특히 《淮南子》의 기록은 고구려 벽화무덤 조성의 밀접한 관련이 있는 저서여서 차후 빠질 수 없는 연구과제이다. 《呂氏春秋》와 《淮南子》는 여불위나 유안과 같은 특정계층의 후원과 비호 아래 전통사상과 새로 받아들인 사상을 하나의 문화로 토착화시키는 전임을 빈객들이 연구 완성한 서적이다. 즉, 《呂氏春秋》와 《淮南子》의 기록은 각 시대별 사상을 계승 반영하여 벽화무덤을 조성하기 위한 시대사상서이기 때문이다. ②이상수 . 안병찬은 쌍기둥무덤에서 적색과 흑색층에서 ‘영성하게 부푼 상태로 존재’ 하는 특성으로 아교의 존재 가능성을 제시하였다. ③《日本書紀》에는 고구려 왕이 승(僧) 담징(曇徵)으로 하여금 제지법(製紙法)과 제묵법(製墨法) 및 여러 가지 안료 외에 맷돌(여기서는 안료 제조용을 뜻함)을 만들었다고 기록되어 있다. 여기서 아교와 관련된 안료는 먹이다. 먹은 그을음을 수거하고 전색제로 사용되는 아교수로 반죽하여 굳혀서 시루에 찌 후 만들어진다. 편년이 있는 초기

벽화무덤들에도 묵서(墨書)와 주서(朱書)가 남아있고, 모두루무덤 내에는 벽화 없이 묵서만 보이고 있어 먹이 서화(書畵)에 일반적으로 상용(常用)되던 필사구(筆寫具)였음을 알 수 있다. 춤무덤 천장벽화에는 오늘날의 것과 동일한 형태의 붓으로 글을 쓰고 있는 신(神)도 보인다. 또, 일본 정창원에는 세계 최고 오래된 신라의 먹이 실물(實物)로 보관되어 있다. ④고구려의 활은 유명하다. 활은 고착력과 탄력성이 좋은 아교가 접착제로 사용된다. 다음은 아교의 실제 실험을 통해서 밝힌 내용이다.

2) 아교 실험자료(개가죽아교수)

고구려 벽화 전문가 양성교육과 전통색 복원의 일환으로 아교의 중요성이 강조되자 일본 문부성에서 2008년 5개년 계획으로 연구가 진행 중에 있다. 그 영향으로 마침내 국내에서도 2009년 아교에 대한 자연과학적 연구가 최초로 이루어져 발표된 바 있다. 즉, 단청에 사용되었다고 믿어왔던 전통 우교(牛膠) 제법의 메카니즘을 규명하는 연구로 고문헌 연구자, 우교 제법의 제조자와 실험 연구자, 유기물 분석 연구자들 총 10명의 공동연구로 이루어졌다. 이 논문은 국내 최초로 채색물감과 관련된 전색제의 자연과학적 연구여서 그 의의가 매우 크다.

위 연구를 시행하면서 다음과 같이 여러 종류의 아교 성능과 기능들을 실험하였다. 국립중앙과학관에 전시물로 제작하기 위하여 고문헌에서 산출지까지 밝혀진 안료들을 가지고 실험 제작하였다. 현행방법으로 목재바탕에 고분자 저분자 우교와 들기름 및 포리졸로도 비교 제작해 보았다. 이때 발표는 하지 않았지만 전통안료와 조선시대 말 서양에서 수입되어 지금까지 사용되는 안료들로도 단청실험을 하여 그 차이점과 장단점들을 파악하였다. 또 문헌사적인 조사로 칠물감, 아교수물감, 유채물감들을 비교해보기도 하였다.

전통적 방법의 재현을 위해 고분자 우교로 현행 단청에 사용되는 재료와 채색기법으로 제작하여 흡수력을 비교, 측정하였다. 채색된 시료들을 1시간 동안 물에 담갔다가 건져보니 육안으로 보아도 심하게 균열된 현상이 그대로 드러나 보였다. 이는 아교의 수축률이 매우 크기 때문이라 생각되고 현행 단청 재현 방법에 문제가 있음을 반증해 준다.

근거는 알 수 없으나 전통적으로 고구려 집안지역 벽화무덤에는 ‘개가죽아교’가 사용된 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 직접 가공하고 침출, 여과, 농축과정을

거친 개가죽아교를 전색제로 이용하여 실험 제작하였다. 실험에 사용된 개가죽아교는 7 개월 이상 건조시켜 돌처럼 딱딱하게 굳은 상태에서 가공하였다.

3) 들기름(乾性油)의 문헌사적 근거

①쌍기둥무덤 채색층을 조사 분석한 유혜선은 “연백을 도포한 다음에 안료를 채색했을 가능성이 매우 높다” 고 보았다. 연백은 건조제이므로 기름(건성유)을 전색제로 사용할 수밖에 없다. 아교는 수축률이 크고 연백도 건조제이므로 균열현상이 쉽게 발생되기 때문이다. ② 《한국어대사전》과

《日本語大事典》에는 ‘밀타승(密陀僧)’의 사전적 어의(語義)에서 삼국시대부터 유채화(油彩畵)에 들기름이 사용되었음을 밝히고 있다. 고구려 승 담징 작(作)으로 추정되는 법룡사(法隆寺) 벽화 채색층에서도 연단과 밀타승이 검출되었다. 연단과 밀타승은 연백을 만들 수 있어야만 제조가 가능한 안료이다.(이 문체는 차후 채색층 실험 연구에서 자세히 언급될 것이다.) ③일본의

《正倉院文書造佛所作物帳》에는 한 승려가 연백을 만들어 포상된 기록과 쌍기둥무덤과도 관계가 있는 회벽(마감층)과 연백으로 채색하는 기법이 처음으로 소개되고 있다. 이 승려의 기록은 《日本書記》에도 보이는데 692 년에 납(Pb)으로 백색안료를 만든 최초의 인물로 포상되었음을 기록하고 있다. 다른 나라의 기술에 전적으로 의존하다가 마침내 일본에서 최초로 연백을 제조하게 된 것을 의미한다. 이때부터 일본장식벽화무덤이 본격적으로 조성될 수 있게 되므로 그 역사적인 의의를 기록으로 남긴 것이다. 고구려 귀화인의 무덤으로 추정되는 타카마쓰 벽화무덤이나 키토리 벽화무덤도 Pb 성분이 검출되었다. ④조선시대 안료 사용 및 수급 상황을 매우 상세히 기록한 의례와 같은 고문헌들을 조사하여도 역시 ‘漆 . 아교 . 들기름’ 등이 언급되고 있다. ⑤ ‘漆 . 아교 . 들기름’은 전통 장인(匠人)이나 전통회화를 제작하는 작가들이 아직도 도료제(塗料劑)나 전색제로 사용하는 물질들이다.

마감층이나 채색층의 백색물감에는 옷의 칠액 성분이 갈변하기 때문에 백색의 전색제로 사용될 수 없다. 따라서 본 연구의 시험편 제작에서는 아교 . 들기름을 이용하여 시험편을 제작하였다. 들기름은 건성유(乾性油)이고 건조성과 침투성이 좋아 일찍부터 사용되어 온 것으로 생각된다. 또 국내에서 쉽게 구할 수 있는 것도 큰 장점이 아닐 수 없다. <각주 32> 참조.

4) 보조제의 문헌사적 근거

마감칠의 보조제는 [Ca 안료+전색제] 물감 건조 시 균열이 발생하지 않도록 첨가시키는 물질을 말한다. 마감칠은 백색이기 때문에 보조제도 백색이어야 하고 동일한 Ca 성분 물질이어야 한다. 또 보조제는 활성(活性)이 가장 좋은 물질이어야 하고 마감층 물감의 성능과 기능을 개선시킬 수 있어야 한다. 8 종류의 탄산염광물 중 이와 같은 성능과 기능을 모두 갖춘 안료는 합분(호분)뿐이다.

조개껍질이 유구(遺構)에 사용된 예들은 한국에서만 보이는 특징적인 것으로 신석기시대부터 그 흔적들이 발견되고 있다. 이 사실은 석회석 가공기술과 밀접한 관련성이 있다. 호분은 주로 대합껍질이나 굴 껍질을 풍화 → 소성 → 연마 → 수비와 같은 일련의 가공단계를 거쳐서 제조한다. 이때 입자가 곱고 순도가 높은 것은 안료로 쓰고 입자가 큰 나머지는 다시 선별하여 벽화무덤의 벽체나 도장용(塗裝用) 재료로 사용되었다.

安田博幸은 한국 고분의 회반죽을 조사 분석 하였는데 신라의 경우 慶州 九政里古墳은 93.97%, 獐山古墳은 93.77%, 忠孝洞古墳은 82.23%, 高靈古墳은 95.21% 이음질 94.91%로 조사되었다. 또 백제는 夫餘 陵山里 東河塚 64.26%, 公州 武零王陵 64.11%, 宋山里 6 号墳 82.42%, 宋山里 5 号墳 20.50%로 분석한 바가 있다. 그런데 경주와 고령의 회반죽에서는 생 조개와 구운 조개껍질 파편이 나와서 호분과 직접적으로 관련지을 수 있다. 구운 조개껍질 파편은 호분을 대량으로 가공했다는 단적인 증거이다. 즉, 마감층 안료는 석회암을 구워서, 또는 조개껍데기를 구워서 하는 두 가지 방법이 적어도 고대부터 이용되어 왔음을 의미한다. 고대기술백과전서인 《천공개물》에도 석회암과 굴의 재를 이용하는 방법이 기록되어 있다.

시험편 제작은 **일본산 길상(吉祥) 성상호분(盛上胡粉)**을 이용하였다.

5. 시험편 제작

〈표 3〉에서 선정된 소석회, 호분, 아라고나이트(aragonite)를 이용하여 아교수와 들기름을 전색제로 하여 시험편을 제작하였다. 물감 제조방법의 가지 수는 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉 마감층 시험편 종류

		마감층 마감의 종류	
시험편 종류	바탕 석재	마감 Ca 1	Ca(OH) ₂ +개가죽아교수
		마감 Ca 2	Ca(OH) ₂ +호분+개가죽아교수
		마감 Ca 3	호분+개가죽아교수
		마감 Ca 4	aragonite+개가죽아교수
		마감 Ca 5	aragonite+호분+개가죽아교수
		마감 Ca 6	Ca(OH) ₂ +들기름
		마감 Ca 7	호분+들기름
		마감 Ca 8	Ca(OH) ₂ +호분+들기름
		마감 Ca 9	aragonite+들기름
		마감 Ca 10	aragonite+호분+들기름

채색 후 특성을 조사하였더니 건조 후 백색도는 〈표 5〉 와 같았으며, 인공풍화 후의 백색도는 〈표 6〉 과 같았다.

건조 후 백색도 1	H 값
Calcite+호분+개가죽아교수(다소 불량)	95.87
Ca(OH) ₂ +개가죽아교수(매우 불량)	92.63
Ca(OH) ₂ + 들기름(가장 불량)	91.76
Calcite+들기름(불량)	89.87
호분+개가죽아교수(매우 양호)	87.55
Ca(OH) ₂ +호분+들기름(불량)	87.07
Calcite+개가죽아교수(불량)	86.66
Ca(OH) ₂ +호분+개가죽아교수(매우 양호)	85.58
호분+들기름(불량)	85.42
Calcite+호분+들기름(불량)	85.22
풍화 후 백색도 1	H 값
aragonite+호분+개가죽아교수(다소 불량)	101.00
Ca(OH) ₂ +개가죽아교수(매우 불량)	97.62
호분+개가죽아교수(매우 양호)	96.97
aragonite+개가죽아교수(불량)	95.78

호분+들기름(불량)가장 어두움	95.25
aragonite+들기름(불량)	92.98
Ca(OH) ₂ +호분+들기름(불량)	92.69
aragonite+호분+들기름(불량)	91.14
Ca(OH) ₂ +호분+개가죽아교수(매우 양호)	50.22
Ca(OH) ₂ + 들기름(가장 불량)	×

<표 5, 6>의 결과에서 아교수를 전색제로 한 시험편들은 백색도가 모두 양호했다. 이에 비해 들기름은 물감 배합비율에 따라 차이를 보이긴 하지만 대체로 황변현상이 보이므로 백색도가 떨어진다.(갈변현상이 보이지 않거나 약해보인다면 그만큼 결합상태가 좋지 못하다는 의미가 된다.)

전색제가 들기름이어도 인공풍화 후 백색도는 다소 좋아지는 경향이 있다. 그런데 쌍기둥무덤 마감층의 시험편으로 추정되는 [Ca(OH)₂ +호분+개가죽아교수]는 <표 7>에서 볼 수 있는 바와 같이 인공풍화 후 백색도가 오히려 35.36 으로 크게 떨어지는 특징을 보인다.

[aragonite+호분+개가죽아교수]는 건조 후나 인공풍화 후의 백색도가 가장 좋은 시험편이다.

<표 7> <백색도 차이 값 비교>

건조 후 → 풍화 후 백색도의 차이	건조 후	풍화 후	차이 값
aragonite+호분+개가죽아교수(다소 불량)	95.87	101.00	+ 5.13
Ca(OH) ₂ +개가죽아교수(매우 불량)	92.63	97.62	+ 4.99
Ca(OH) ₂ + 들기름(가장 불량)	91.76	×	×
aragonite+들기름(불량)	89.87	92.98	+ 3.11
호분+개가죽아교수(매우 양호)	87.55	96.97	+ 9.42
Ca(OH) ₂ +호분+들기름(불량)	87.07	92.69	+ 5.61
aragonite+개가죽아교수(불량)	86.66	95.78	+ 9.12
Ca(OH) ₂ +호분+개가죽아교수(매우 양호)	85.58	50.22	-35.36
호분+들기름(불량)	85.42	95.25	9.83
aragonite+호분+들기름(불량)	85.22	91.14	5.92

1) 단면구조의 특징

<표 8> 단면구조

마감층 단면구조의 특성				
	물감의 종류(상태)	채색 후		풍화 후
마감 Ca 1	Ca(OH) ₂ + 아교수 (매우 불량)	채색상태 그대로 임.		×
마감 Ca 2	Ca(OH) ₂ + 호분+아교수(매우 양호)	호분이 아교수에 녹아 바탕석재 쪽으로 전면 스며들었다. 상온에서 이미 탄산칼슘 층 생성.		
마감 Ca 3	호분+아교수(양호)	호분이 아교수에 녹아 바탕석재 쪽으로 전면 스며들었다.		
마감 Ca 4	aragonite+아교수(불량)	바탕석재 쪽으로 전면 스며든 후 부풀어 오르면서 재결정화 됨.		
마감 Ca 5	aragonite+호분+아교수(불량)	아교수에 녹아 바탕석재 쪽으로 전면 스며들었으나 인공풍화 후 변형되었다.		
마감 Ca 6	Ca(OH) ₂ + 들기름(가장 불량)	채색상태 그대로 변화가 없음.		×
마감 Ca 7	호분+들기름(불량)	바탕석재 쪽으로 잘 스며들었다.		
마감 Ca 8	Ca(OH) ₂ + 호분+들기름(불량)	물감은 잘 흡착되었으나 채색상태 그대로 변화가 없다.		
마감 Ca 9	aragonite+들기름(불량)	물감은 잘 흡착되었으나 채색상태 그대로 변화가 없다.		
마감 Ca 10	aragonite+호분+들기름 (불량)	대부분 채색상태 그대로지만 호분이 들기름에 녹아 일부 바탕석재에 스며든 경우가 있다.		

아교수를 전색제로 한 시험편들은 대부분 Ca 성분물질들이 잘 녹아 분산되는 특성을 보인다. 특히 호분이 포함된 시험편들은 하나같이 아교수에 완전히 녹아 바탕석재 쪽으로 전면 스며들어 잘 결합된 상태를 보여주었다.

전색제로 들기름을 사용할 때에도 바탕석재의 흡유율이 매우 좋기 때문에 Ca 탄산염광물들은 기름에 잘 흡착된 상태이거나, 또는 잘 결합된 단면구조를 보인다. 그러나 벽화무덤에서는 건조가 어렵고 황변현상이 나타나므로 사용할 수 없다.

2) 표면구조의 특징

〈표 9〉 마감층의 표면구조

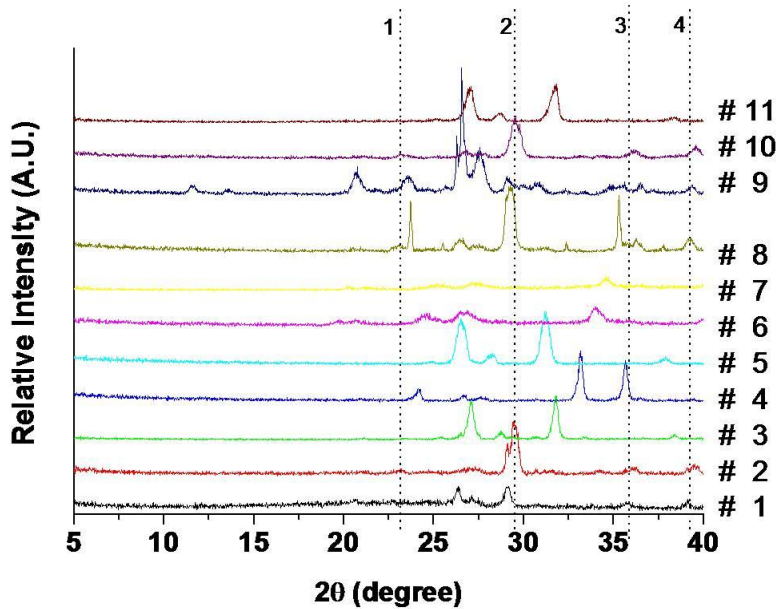
마감층과 백색층 표면구조의 특성				
	물감의 종류(상태)	채색 후	표면구조	인공풍화 후
마감 Ca 1	Ca(OH) ₂ + 아교수 (매우 불량)	석회입자와 입자 사이에 많은 기공들이 존재하고 일부 바탕석재가 드러나 보일 정도로 매우 엉성한 결합상태를 보인다.		×
마감 Ca 2	Ca(OH) ₂ + 호분+아교수 (매우 양호)	인공풍화 전 상온에서 이미 표면구조에 탄산칼슘의 결정 성장이 잘 생성되어 전혀 다른 물질처럼 변했다.		
마감 Ca 3	호분+아교수 (매우 양호)	가소성이 좋아 물감의 응집력이 있고 표면구조 치밀한 편이며 돌처럼 견고해지며 백색도가 좋아진다.		
마감 Ca 4	aragonite+아교수 (불량)	표면구조에 많은 기공들이 분포하고 있어 강도가 약하다.		
마감 Ca 5	aragonite+호분+아교수(다소 불량)	상온에서 이미 마감층 표면에 탄산칼슘의 결정층이 생성되었으나 크고 작은 기공들과 불균일한 표면구조를 보인다.		
마감 Ca 6	Ca(OH) ₂ + 들기름 (불량)	안료입자가 그대로 드러나고 거친 결합상태를 보인다.		×
마감 Ca 7	호분+들기름 (불량)	물감은 양호하나 무덤 내에서는 건조가 어렵기 때문에 사용하기 어렵다.		
마감 Ca 8	Ca(OH) ₂ + 호분+들기름(불량)	건조과정 중 Ca(OH) ₂ 에 들기름이 분해되므로 완전 건조 후 비교적 양호한 구조이다.		
마감 Ca 9	aragonite+들기름 (불량)	aragonite 는 기름에 녹지 않아 안료입자가 침상형으로 별 변화가 없다.		
마감 Ca 10	aragonite+호분+들기름(불량)	표면구조 치밀한 결합상태를 보이나 기름에 의한 황변현상이 두드러진다.		

들기름을 전색제로 이용한 물감은 산화중합으로 결합하기 때문에 마감층 표면에 탄산칼슘의 반응성 막이 생성될 수 없다. 또 기름에 의한 황변현상도 나타나기

때문에 벽화의 마감층에는 사용할 수 없는 물감이다. 즉, 마감층에는 아교수만이 전색제로 사용 가능하다.

마감층으로 가장 양호한 시험편은 $[Ca(OH)_2 + \text{호분} + \text{개가죽아교수}]$ 이다. 이 시험편의 표면구조는 탄산칼슘의 결정성장이 인공풍화 전 상온에서 이미 잘 생성된 것으로 조사되었다. 또 코팅률도 좋아 채색 후와 인공풍화 후는 전혀 다른 단면구조와 표면구조를 보인다. <표 10> 의 (# 2 인공풍화 후 XRD 측정결과 참조)

<표 10> $[Ca(OH)_2 + \text{호분} + \text{아교수}]$ 시험편의 XRD 측정결과(# 2)



3) 무게변화 조사

무게변화는 물성변화에 대한 가장 기본적인 조사 방법으로 제작된 시험편들은 채색 전과 채색 후 및 인공풍화 후의 무게들로 구분하여 각각 측정하였다. 다음 숫자들은 물감의 종류와 배합비율에 따라 시험편을 3 개씩 선정하여 각각 3 회씩 9 번 측정하여 평균하였으며, 그 결과는 <표 11>과 같다.

<표 11> 마감칠 후와 건조 후의 무게변화(평균값)

물감 종류(상태)	마감칠 후	건조 후	무게 차
$Ca(OH)_2 + \text{아교수}$ (매우 불량)	11.30	10.95	- 0.35
$Ca(OH)_2 + \text{호분} + \text{아교수}$ (매우 양호)	12.12	11.87	- 0.25

호분 + 아교수(매우 양호)	11.56	11.45	- 0.11
aragonite + 아교수(불량)	11.74	11.65	- 0.08
aragonite + 호분 + 아교수(불량)	11.51	11.36	- 0.15
Ca(OH) ₂ + 들기름(불량)	12.55	12.67	+ 0.12
호분 + 들기름(무덤 내에서는 불량)	11.15	11.23	+ 0.08
Ca(OH) ₂ + 호분+ 들기름(불량)	11.35	11.55	+ 0.20
aragonite + 들기름(불량)	11.38	11.43	+ 0.05
aragonite + 호분 + 들기름(불량)	11.45	11.54	+ 0.09

물감은 전색제의 종류에 따라 무게 변화가 달라진다. 아교수로 마감칠 한 시험편의 건조는 채색 직후에 무겁다가 건조 후나 인공풍화 후에도 계속 가벼워진다. 들기름의 경우에는 채색 직후 손으로 만져서 묻어나지 않을 때까지 계속 무거워지다가 칠한 물감이 굳어지면서 점차 가벼워지기 시작한다.

마감칠 후와 건조 후 무게 차가 가장 큰 시험편은 [Ca(OH)₂ +아교수](-0.35)이고, 그 다음은 [Ca(OH)₂ +호분+아교수](-0.25) 이다.

3. 인공풍화 후 특성

〈표 13〉 건조 후와 인공풍화 후의 무게변화(평균값)

물감 종류(상태)	건조 후	인공풍화 후	무게 차
Ca(OH) ₂ + 아교수(매우 불량)	11.07	×	×
Ca(OH) ₂ + 호분 + 아교수(매우 양호)	11.56	11.61	+ 0.05
호분 + 아교수(매우 양호)	11.40	11.38	- 0.02
aragonite + 아교수(불량)	11.64	11.22	- 0.42
aragonite + 호분 + 아교수(불량)	11.36	11.26	- 0.10
Ca(OH) ₂ + 들기름(불량)	12.67	×	×
호분 + 들기름	11.23	11.12	- 0.11
Ca(OH) ₂ + 호분+ 들기름(불량)	11.55	11.61	+0.06
aragonite + 들기름(불량)	11.43	11.16	- 0.27
aragonite + 호분 + 들기름(불량)	11.54	11.44	- 0.10

인공풍화 후 무게변화가 가장 큰 경우는 [aragonite+아교수](-0.42)이고 그 다음은 [aragonite+들기름](-0.27)이다. 또 무게변화가 가장 적은 경우는 [호분+아교수](-0.02)와 [Ca(OH)₂+호분+아교수](+0.05)이다.

[Ca(OH)₂+호분+아교수](+0.05)와 [Ca(OH)₂+호분+들기름](+0.06)을 보면 인공풍화 후 다소 무게가 올라간 것으로 조사되었다.

VI. 고찰

고구려 벽화 마감층의 주성분 재료로 사용된 Ca(OH)₂는 다공질 물질로 건조과정에 나타나는 수축현상에 의해서 자연적으로 균열이 발생한다. Ca(OH)₂의 미세구조는 매우 영성한 결합상태를 보이고 불균일하며 은폐력이 매우 부족하다. 뿐만 아니라 전색제 아교수는 수축률이 매우 큰 물질이다. 그러므로 마감층의 균열문제를 해결하는 것은 벽화제작에 있어 가장 큰 난관이요, 벽화제작 비법(秘法)에 있어서 가장 중요한 핵심기술 중 하나이다.

[Ca 성분 안료+전색제] 물감으로 제작된 시험편들은 균열현상이 심하게 나타나므로 보조제 호분을 첨가하여 시험편들을 제작하였다. 그 결과 Ca 성분 마감층 물감 실험에서 가장 양호한 순서는 [Ca(OH)₂+호분+개가죽아교수](매우 양호) → [호분+개가죽아교수](양호) → [aragonite+호분+개가죽아교수](다소 불량)이다. 물감의 성능과 기능으로 볼 때 마감층에는 [Ca(OH)₂+호분+개가죽아교수]가 좋고, [호분+개가죽아교수]는 채색층의 백색물감으로 적당하다. 하지만 남북한공동연구로 조사 분석된 고구려 벽화 채색층의 백색은 대부분 연백으로 조사되었다. 따라서 호분은 처음부터 보조제로만 사용된 안료로 보인다.

마감층 시험편의 전색제는 아교수만 사용 가능하다. 그 이유는 아교수를 전색제로 한 시험편들은 모두 백색도가 양호하나, 들기름은 대체로 황변현상이 보이므로 백색도가 떨어진다. 아교수는 증발건조에 의한 것이다. 들기름은 산화중합으로 건조되고, 특히 다공질의 석회 모르타르 벽화무덤에서는 건조되지 않고 설사 건조되었더라도 도막이 다시 회복되기 쉬운 환경이라 사용이 어렵다. 뿐만 아니라

들기름은 표면구조에 탄산칼슘 층이나 반응성 결정성장이 전혀 생성되지 않아 쌍기둥무덤에서 조사된 내용과도 맞지 않는다.

쌍기둥무덤 마감층의 시험편으로 추정되는 $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{개가죽아교수}]$ 는 건조 후 백색도가 85.42 인데 인공풍화 후에는 오히려 50.19 까지 떨어진다. 그러므로 10 개 시험편 중 7 번째에 해당되므로 백색도는 매우 낮은 편이다. 백색도가 이러한 특징을 보이는 것은 표면구조에 탄산칼슘의 결정층이 잘 생성되었기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 그러나 마감층이란 것은 그대로 벽화의 배경색이 되므로 채색층의 백색 보다 백색도가 낮아야 다른 색들이 잘 드러날 수 있다. 다시 말해서 마감층의 $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{개가죽아교수}]$ 는 철저히 계산된 물감 사용법이다.

$[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{개가죽아교수}]$ 의 단면구조와 표면구조를 보면 다음과 같다. 아교수를 전색제로 한 시험편들의 단면구조는 대부분 Ca 성분 물질들이 아교수에 녹아 잘 분산되는 특성을 보인다. 특히 호분이 포함된 시험편들은 하나같이 아교수에 녹아 바탕석재 쪽으로 전면 스며들어 잘 결합된 상태를 보여준다. 또 이 시험편의 표면구조는 탄산칼슘의 결정성장이 인공풍화 전 상온에서 이미 잘 생성된 것으로 조사되었다. 또 코팅률도 좋아 이전과는 전혀 다른 단면구조와 표면구조를 보인다.

$[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{개가죽아교수}]$ 의 무게변화를 보면 다음과 같다. 마감칠 후와 건조 후의 무게 차가 가장 큰 시험편은 $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{아교수}] (-0.35) \rightarrow [\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{아교수}] (-0.25)$ 순이다. 이와 같이 무게 차가 큰 이유는 이미 건조과정에서 탄산화 되는 것과 관계가 있는 것으로 추정된다. 이에 비해 인공풍화 후 무게변화가 가장 적은 경우는 $[\text{호분} + \text{아교수}] (-0.02)$ 와 $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{아교수}] (+0.05)$ 이다. 인공풍화 후 무게 차가 적다는 것은 무덤 내의 환경변화에 거의 영향을 받지 않았다는 뜻이다. 즉, 두 물감은 무덤 내의 급격한 환경변화나 장기적인 보존에도 변질이 없고 내구성이 좋은 것으로 볼 수 있다. 또 $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{아교수}] (+0.05)$ 와 $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{호분} + \text{들기름}] (+0.06)$ 을 보면 인공풍화 후 약간의 무게가 올라간 것으로 조사되었다. 이것은 물감이 완전 건조된 후 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CO_2 흡수물질로 변하는 것과 관계가 있을 것으로 추정된다. 또 인공풍화 후의 무게변화가 가장 큰 경우는 $[\text{aragonite} + \text{아교수}]$ 이다. 이는

aragonite 가 선정된 Ca 안료 중 무덤 내의 환경변화에 가장 쉽게 변화되기 쉬운 물질임을 의미한다. 이는 aragonite 가 백색도는 가장 좋지만 마감층 안료로 사용하기 어려운 이유이다.

다음은 바탕석재와 $[Ca(OH)_2 + \text{호분} + \text{아교수}]$ 물감의 결합관계를 살펴보기로 한다. $Ca(OH)_2$ 와 호분은 건조과정에 입자표면에 부착한 물이 모세관 흡착을 하기 때문에 안료 입자와 입자가 서로 결합하면서 응집체(凝集體)를 형성한다. 이때 아교수와 호분은 분산성(Distribution)이 매우 좋아 바탕석재와 마감층에 부족했던 접착력과 강도를 얻어 돌처럼 단단히 굳게 되는 것으로 추정된다. 이를 좀 더 상세히 살펴보면 다음과 같다.

$[Ca(OH)_2 + \text{호분} + \text{아교수}]$ 물감의 $Ca(OH)_2$ 는 원소 결합으로 이온성이 매우 좋은 친수성(Hydrophilic) 물질이다. 또 아교수가 $Ca(OH)_2$ 의 Ca 이온과 반응하여 불용성인데 반해 호분의 Ca 이온은 아교수에 잘 녹아 수산화물을 생성하여 겔화(Gel)된다. 마감층 표면의 수산기(OH^-)는 액체 중에서는 산성화 되어 용매화(溶媒化, solvent), 전리(電離)에 대한 전하(電荷) 형성에 관여하여 탄산칼슘의 결정성장 및 반응성 막 생성에 기여하는 것으로 추정된다. 또한 아교수가 호분 및 $Ca(OH)_2$ 입자 표면에 흡착하면 소수성(疏水性(Hydrophobic))이 되어서 물이 더 이상 부착하기 어렵다. 때문에 아교수를 사용하면 $Ca(OH)_2$ +의 응집성은 건조과정에 급격히 저하하고 탄산칼슘 결정성장도 다소 억제되는 것으로 추정된다. 그러므로 $[Ca(OH)_2 + \text{호분} + \text{아교수}]$ 물감은 백색도가 낮고 저온에서도 안정하다.

아교는 물과 기름의 가교제(架橋, Physical crossking agent)이다. 또, 개가죽 기름은 굳지 않는 성질이 있다. 개가죽을 이용한 아교수는 무기염의 안료를 녹여 석재에 고착되도록 하는데 중요한 역할을 했을 것이다. 특히 개가죽아교는 차가운 물에도 잘 녹을 수 있는 특성을 지니고 있다. 이런 이유로 무덤 내부 계절변화에 따라 결로현상이 발생하고 상대습도가 거의 100%에 달하면 물에 아교가 용해되어 배수되어 버릴 수 있다. 이런 경우는 침단기기로 측정하여도 아교 성분이 검출되지 않은 이유로 설명될 수 있다.

탄산칼슘이 주성분인 안료는 용해도가 낮아 중성의 물에는 잘 녹지 않지만 산성의 용액과 중화반응이 일어나면서 천천히 녹아 전체적으로 약염기성을 띠게 된다.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 이온 해리도가 높아 아교수에 Ca 가 이온화되므로 아교 성분 중 물에 녹으려는 성질이 있는 쪽과 경쟁하게 되므로 아교성분을 배척하게 되어 서로 섞이지 않으려 한다. 그러나 호분은 CaCO_3 가 주성분이므로 이온 해리도가 낮아 물에 녹아 있는 상태에서도 아교수와 친수성이므로 서로 섞이게 되어 겔화(Gel)된다.

염기성반응이 가장 잘 나타나는 시험편은 [aragonite+아교수]이다. [aragonite+아교수]의 표면구조를 살펴보면 크고 작은 기공들이 다수 보이고, 단면구조에는 탄산칼슘이 재결정화 되면서 부풀어 올라 변형된 모습까지도 관측된다. 대부분의 천연재료는 특정 성분이 어떤 현상을 만들기도 하지만 제조과정에서 복합적으로 작용하는 경우도 있어서 단정적으로 말하기는 어렵다. 아마도 수산기 이온(OH^-)이 아교수의 수용액 중에서 산성의 수소이온(H^+)과 결합할 때 aragonite 가 가장 쉽게 반응하는 것과 관계가 있을 것으로 추정된다.

고구려 벽화무덤은 주도면밀한 계획 아래 철저히 계산되어 과학적으로 설계된 공간이다. 벽화무덤은 구조적으로 건식벽화라 하더라도 무덤 내부에는 결로현상과 상대습도가 높아서 Ca 성분은 언제나 물과 반응할 수밖에 없도록 처음부터 설계된 것이다. 평양과 집안지역은 강우량이 많고 온습도가 높다. 문화재의 적은 물이지만 무덤 내 외부의 이러한 자연환경은 벽화보존과 오히려 밀접한 상관관계가 있다. 즉, 쌍기둥무덤 널길 벽화의 마감층은 금도금 하듯 탄산칼슘 층으로 벽체와 벽화를 보호하기 위한 코팅기술이 이용되었고, 벽화무덤은 이를 영구적으로 보존하기 위한 밀폐공간이다. 또 벽화무덤에 사용된 호분은 결로현상이 발생하는 기간 동안 연례적으로 녹았다가 다시 재결합 했을 것으로 추정된다.(일종의 백화현상)

V. 결론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 8 종류 칼슘성분의 탄산염광물 가운데 고구려 벽화에 사용 가능한 물질로는 소석회, 합분(호분)으로 판단된다. 그 이유는 10 종류의 물감 실험 결과 가장 양호한 마감층은 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 호분+개가죽아교수]로 제작된 시험편이기 때문이다.

즉, 주성분 안료는 'Ca(OH)₂' 이고, 보조제는 '합분(호분)' 이며 전색제는 '개가죽아교수' 일 가능성이 매우 높다.

둘째, 쌍기둥무덤에서 조사 분석된 내용들을 보면 마감층 표면에는 모두 탄산칼슘 층이 생성되었다. 본 연구의 실험 결과 [Ca(OH)₂ + 호분 + 개가죽아교수] 물감은 상온에서도 탄산칼슘의 결정성장이 잘 생성되어 선행 조사된 사실과 실험 결과의 내용이 일치되었다. 따라서 쌍기둥무덤 널길 벽화는 건식벽화로 제작되었고, [Ca(OH)₂ + 호분 + 개가죽아교수] 물감이 사용되었다고 유추할 수 있었다.

셋째, 벽화 보존의 비법 중 하나는 보조제 호분에서 비롯된다. 호분은 고구려 벽화의 무기질 바인더로서 물감을 부드럽게 해주고 채색이 잘 되는 작업 향상제이며 응집력이나 접착력이 크게 좋아지는 결합제이다. 또한 흡수력 . 흡유력이 좋아 바탕석재 전면에 잘 스며들고, 돌처럼 치밀해지면서 단단하게 굳게 하는 경도 향상제, 충전제, 증량제이며 부족한 Ca(OH)₂ 의 물성을 개선시키는 물감 개선제, 탄산칼슘의 반응성 막이 생성되는 코팅제이다. 최근 세라믹 업계에서는 바인더의 의미가 결합제만이 아니라 활제, 또는 가소성을 함유한 복합제(複合劑, complex system)로 확대 해석하고 있다. 호분이 그 대표적인 예이다.

《참고문헌》

=고문헌 및 사전류=

『淮南子』卷 20 「泰族訓」

『仁政殿營建都監儀軌』(1805),

『昌德宮營建都監儀軌』(1834),

『仁政殿重修儀軌』(1857), 『경복궁, 창덕궁선원전일실증건도감의궤』(1900)

李圭景, 《오주연문장전산고》(1788~?)

柳重臨, 《증보산림경제》, 1766 년(완성)

徐有榘, 《임원경제지》, 1764 년 ~ 1845 년.

吳世昌, 『槿域書畫徵』, 시공사, 1998, 10 쪽.

정인승 외 6 명, 《한국어대사전》, 삼성문화사, 1986.

=논문 류=

김수진, 『동굴 흑색 오염 방지 및 제지방안 연구보고서』 문화재청, 2001, 78~79 쪽.

도진영, 「석조기념물 흑색표면층에 있는 염의 특성과 기원」, 『보존과학회지』 15 호, 1994.

도진영 외, 「국내산 천연 무기안료의 특성연구」, 『2008 년 춘계 한국세라믹학회』, 한국세라믹학회, 2008.

徐吉洙, 「평양지역 고분벽화의 분포현황과 보존 방향」, 『고구려 연구』 제 3 집, 고구려 연구회. 1997, 84 ~ 91 쪽.

서만철, 『송산리 고분군 현황 보존』, 공주대학교기초과학연구소 . 충청남도 공주시, 1997.

徐榮洙 . 金希燦, 「미송리형 토기와 청동기시대 유물에 대하여」, 『고구려 연구』 5 집, 1998, 9 쪽.

존 윈터, 「韓國 古代 顔料의 成分 分析」, 『미술자료』 43, 국립중앙박물관, 1989, 1~8 쪽.

이상수 . 안병찬, 「고구려 벽화 제작기법 시고」 『고구려 연구』 5 집, 고구려연구회, 1998, 195~216 쪽.

안병찬, 「高句麗 古墳壁畫의 製作技法 研究-바당벽 제작기법을 중심으로-」 『高句麗 研究』 제 16 집, 학연문화사, 2003, 457~480 쪽.

안병찬 외, 「궁궐채색기술 특성규명 연구」, 『문화재』 35 호, 국립문화재연구소, 2008.

俞惠仙, 「高句麗 雙楹塚 壁畫의 顔料分析」, 『박물관 보존과학』 제 6 집, 국립중앙박물관 보존과학실, 2005, 47~54 쪽.

이상진 외, 「-궁궐 채색기술의 현대적 활용 연구- 단청과 벽화안료의 재질 특성과 채색기술, 기능에 관한 과학적 연구」, 『전통과학기술실용화 연구개발사업』 국립문화재연구소, 2008.

이구중, 『석회』 여름호 제 11 권 2 호 , 한국석회석가공협동조합, 2006, 36~38 쪽.

이화수 . 한경순, 「고구려 고분벽화의 석회 마감층에 관한 연구」, 『보존과학회지』 제 19 호, 한국문화재보존과학회, 2006, 43~56 쪽.

전호태, 「집안 고구려고분벽화 개관」, 『고구려 고분벽화』 고구려특별대전, KBS 한국방송공사, 1994, 9~31 쪽.

최인숙 외, 「고대 벽화안료 재질분석 연구」, 『한국세라믹학회 추계발표회 논문집』, 2008.

蔡美榮, 「고구려 벽화무덤의 바탕재에 관한 고찰 -석회 모르타르를 중심으로-」, 『고구려연구』 제 9 집, 학연문화사, 2000, 45~108 쪽.

蔡美榮, 「흙무덤과 씨름무덤의 벽화재료」, 『고구려연구』 제 7 집, 학연문화사, 275~322 쪽.

---, 「흙무덤 . 씨름무덤 벽화 구성과 복원에 관한 문제」, 『한국문화재보존과학회』 제 22 회, 2005.

---, 「흙무덤과 씨름무덤 벽화 구성 원리」, 『고구려연구』 제 28 집, 2007.

--- 외 9 명, 「겨레과학 “갯풀(아교)” 의 제조 메카니즘 복원과 단청용 교착제 개발 연구」, 『겨레과학과학기술응용개발사업』, 국립중앙과학관, 2009.

=단행본 및 번역서=

宋應星 著, 최 주 역, 『천공개물』, 전통문화사, 1997, 251~253 쪽.

耿鐵華, 「集安 高句麗벽화무덤 및 그 보호」, 『中國境內 高句麗遺跡 研究』, 예하. 1995, 202 쪽.

李殷福 . 車勇杰 . 金仁經, 『中國內의 高句麗遺蹟』, 학연문화사, 1994, 95~96 쪽.

崔盛洛, 『한국 원삼국문화의 연구전남지방을 중심으로』, 학연문화사, 1994, 370~372 쪽.

히라오 요시미즈 편저 . 최영희 옮김, 『문화재를 연구하는 과학의 눈』, 학연문화사, 2001, 112~117 쪽.

=보고서 류=

고구려연구재단, 『환인 . 집안지역 고구려 유적 지질조사 보고서』, 2005. 68~97 쪽.

고구려연구재단, 『평양일대 고구려 유적』, 남북공동유적조사보고, 2005.

고구려연구회 . ICCMOS 한국위원회, 『한 . 중 고구려 유적 UNESCO 세계유산 등재의 현황과 대책』, 유네스코(UNESCO) 한국위원회, 2003.

김순관 . 이한영 . 김숙경, 「고구려 벽화고분(진파리 4, 1 호)의 벽화제작 기법 연구」, 『남북공동고구려 벽화고분보존연구보고서』, 2007, 37 쪽. 40 ~ 41 쪽.

문화재청, 『문화재 수리용 강회 혼합재 조사 . 연구』, 1999.

안병찬 . 홍종욱, 「고구려 고분벽화의 안료 분석」, 『고구려벽화고분 보존실태조사보고서』 제 1 권, 국립문화재연구소.남북역사학자, 2006,

이찬희.김지영.이명성, 「한국 경주석빙고의 손상도와 미기후 분석」, 『한일공동연구보고서 -문화재 보존환경과 복원기술 연구-』, 한국 문화재청 국립문화재연구소 . 日本 國立文化財機構 文化財研究所, 2008, 1 ~ 14 쪽.

이태녕, 「보존과학적 측면에서 본 순흥벽화고분의 현황과 대책」, 『순흥읍내리벽화고분 - 발굴보고서』, 대구대학교 박물관, 1995.

한국전통문화학교 보존과학연구소, 『부여 무량사 소조아미타여래삼존좌상 안전진단 보고서』, 부여군청, 2011, 106 ~ 107 쪽.

Rodolfo Lujan Lunsford, 「Two Similer Tombs with Divergent Conservation Problems Assessment of the State of Preservation and Documentation of the Mural Paintings-서로 다른 보존문제를 가진 동종의 2 개 고분」, 『고구려 고분의 보존과 관리』 ICOMOS 한국위원회, 2004, 49 ~ 54 쪽.

---, 『Conservation of Koguryo Tombs 고구려 고분의 보존』, 문화재청 . UNESCO 공동주최보고서, 2004, 102 쪽.

Racco Mazzeo, Scientific investigations of the Tokhung-ri mural paintings of Koguryo era, democratic people's republic of Korea」 『고구려 고분벽화 국제세미나』 문화재청 . 국립문화재연구소, 2005, 13 쪽.

Katsuhiko Masuda, 「타카마쓰카 고분과 키토라 고분의 보존과 관리」, 『고구려 고분의 보존과 관리』 ICOMOS 한국위원회, 2004, 49 ~ 54 쪽.

=원서 류 및 사전=

《日本語大事典》, 講談社, 1989.

安田博辛 , 「古代の丹 . 朱と漆喰」 『古代日本の知恵と技術』 , 大版書籍, 1983, 20 쪽.

『正倉院文書造佛所作物帳』 「大日本古文書 24」天平 6 年 5 月 1 日 類取.

山崎一雄, 『古文化財の科學』, 思文閣出版, 1987, 69 ~ 97 쪽.

渡邊明義 . 増田勝彦, 「高松塚古墳壁畫 損傷狀況 修理」, 『國寶 高松塚古墳壁畫 保存處理』 (日本文化廳), 1987.

早川泰弘.城野誠治, 「高松塚古墳壁畫 研究の螢光 X 선분석」, 『第 28 회 文化財の 保存および 修復に關する國際研究集會』, 獨立行政法人文化財研究所 東京文化財研究所, 中央公論美術出版, 2004, 15 ~ 16 쪽.

=그 외 =

KS A 0067 2006, 『L, A, B 표색계 및 L, U, V 표색계에 의한 물체색의 표시 방법』, 개정.

(주)한승이앤아이 자료 참고-<http://hseni.co.kr>

= abstract =

Study on the Coating Material Used in the Mural Paintings of Goguryeo Tombs

- Focusing on the Ca-based Ingredients Found in the Twin Column Tomb

-

The main ingredient of the coating (preparation) layer, on which wall paintings are applied, has been identified as Ca. Ca-based material is white in color, so it can be used as a white pigment of the paint layer, as well as for the preparation layer that coats the stone surface. In nature, there are seven types of materials that are classified as Ca. However, even in UNESCO and in Japan, where Goguryeo mural painting specialists are being trained, they are all lumped into one material which is Ca. The preceding researchers who

have surveyed and analyzed the Twin Column Tomb murals are no exception. Despite being the same subject of study, Ca-based material is described with different names depending on their searchers, and the same material is sometimes described differently even in papers by the same researcher. Under the circumstance, when a mural is to be preserved or reproduced, it is not easy to determine exactly what type of material it was that the researchers referred to in their papers.

The research objectives of this paper are to find out: a) exactly what kind of Ca-based material was used as a white pigment in the paint and preparation layers; b) what type of binding and other media were used; and c) since the color of the Goguryeo mural paintings is not just "painted with a brush and then stuck," what kind of physical and chemical relationships are there between the stone substrate and the preparation layer (preparation layer: Ca-based material), between the paint layer, in addition to what are the ingredients of the paint (pigment, extender and auxiliary agent). Among these objectives, the Ca-based preparation layer is the first research subject to be dealt with in understanding the pigment composition and the execution technique of the mural.

= Key words =

white preparation layer (Ca-based material),
calcium hydroxide [Ca(OH)₂], shell powder-based white pigment (hobun),
dogskin glue water, alkalinity."