

천연 수경성 석회 (NHL)를 사용한 고분벽화 벽체 보강제 적용성 연구

The Application of Natural Hydraulic Lime as a Reinforcing Agent for Mural Paintings in Ancient Tombs

유영경¹, 이화수^{2,*}

1 충북대학교 문화재보존기술지원센터

2 충북대학교 목재·종이과학과

Yu Yeong Gyeong¹, Lee Hwa Soo^{2,*}

1 Heritage Science Center, Chungbuk National University, Cheongju, 28116, Korea

2 Department of Wood and Paper Science, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea²

* Corresponding Author:
Lee Hwa Soo

요약

고분벽화 벽체 보강제로써 천연 수경성 석회의 적용 가능성을 확인하고자 실험연구를 실시하고 그 결과를 제시하였다. 선행된 고구려 고분벽화 관련 연구를 통해 벽체 의사시료와 NHL 제품을 활용한 조건별 보강제 시료를 제작하였다. 시료는 고분 내부 환경을 고려한 고습 조건에서 7일, 28일, 84일간 양생하였으며, 기간별 치수안정성 및 강도 등 물성평가를 수행하였다. 실험 결과, NHL 제품은 경화속도가 빠르고 수축률이 적어 보강제로써의 적합성은 확인되었으나 벽체 물성대비 강도 차이가 크고 백색도가 떨어지는 등의 단점이 확인되었다. 치수안정성 및 압축강도 평가 결과 NHL 제품과 고분벽화 벽체 의사시편을 혼합한 조건이 상대적으로 벽체 보강제로써 적합한 값을 지닌 것으로 나타났다. 따라서 손상된 고분벽화 벽체 보강제로 천연 수경성 석회를 적용하기 위해서는 대상 벽체의 조건에 따라 적합한 경화시간 및 강도를 발현할 수 있는 조건이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

주제어 : 고분벽화, 고습 환경, 벽체 보강제, 천연 수경성 석회, 보존

Abstract

An experimental study was conducted to test the applicability of natural hydraulic lime (NHL) as a reinforcing agent for the supporting layers of mural paintings in ancient tombs. Drawing upon preceding studies on mural paintings in ancient tombs, samples of reinforcing agents for various conditions were prepared using NHL products, and pseudo-samples of the supporting layers of mural paintings were also produced. The samples were cured for 7, 28, and 84 days in a high-humidity condition similar to that of the mural-tomb environment. Physical properties such as dimensional stability and compressive strength were measured for each curing period. The results indicated that the NHL samples had a rapid curing speed and a low contraction ratio and are therefore suitable as reinforcing agents, whereas they showed a poor match in terms of strength compared to the supporting layer, and also low whiteness. The dimensional stability and compressive strength tests revealed that an NHL product mixed with a pseudo-sample of a supporting layer provided desirable conditions for reinforcing agent. The findings suggested that different conditions for curing time and strength should be considered for each supporting layer prior to applying NHL as a reinforcing agent for damaged mural paintings in ancient tombs.

Keywords : Mural painting in ancient tomb, High humidity condition, Reinforcing agent, Natural hydraulic lime, Conservation

1. 머리말

우리나라 고분벽화 보존관련 연구는 1986년 순흥 읍내리 고분벽화 조사와 보존처리를 시작으로, 최근에는 고분벽화의 환경과 재질특성 및 보존 상태에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 2007년에는 한국 보존과학자들에 의해 북한의 고구려 시대 진파리 고분벽화에 대한 재질 특성 연구가 이루어졌으며^[1], 2011년에는 백제시대 송산리 6호분 벽화의 보존상태 및 제작기법에 관한 연구^[2], 2014년에는 가야시대 고아리 고분벽화의 보존상태 및 재질 특성 연구가 이루어졌다^[3]. 이와 같이 최근 들어 고대 고분벽화 관련하여 다양한 과학적 분석조사가 이루어지고 있는 추세이나, 벽화에 발생된 손상에 대해 실질적으로 대처할 수 있는 보존처리 기술 또는 재료에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

한국 고대 고분벽화는 99% RH 이상에 달하는 고분 내부의 고습한 환경으로 인해 지상에서 보존되는 벽화와 다른 조건을 지니고 있으며, 물리적 파손과 습기에 대처할 수 있는 보다 특별한 보강재료를 필요로 한다. 무엇보다도 균열이나 파손 등 물리적 손상이 발생된 벽체에 대한 보강이 필요할 경우, 고습한 환경에서 안정적인 경화가 이루어질 수 있는 재료여야 하며 원 벽체 재질과의 유사성 및 내구성에 대한 기능적인 요소가 필수적이다.

최근 습한 환경 조건에 있는 문화재에 대해 모르타르 보강이 필요한 경우, 천연 수경성 석회(Natural Hydraulic Lime, 이하 NHL)를 사용하는 사례가 국제적으로도 늘고 있는 추세이다. NHL은 고대부터 건축 재료로 오랫동안 사용되어 왔으며, 근래에는 여러 제품의 NHL이 일본이나 유럽 등에서 고대 건축물 복원에도 널리 활용되고 있다.

유럽과 미국에서는 NHL을 종류별로 생산하여 상용화되어 널리 사용하고 있으며, 각 국가별로 자국의 원석을 이용하여 제조한 NHL에 관한 여러 가지 특성 개선에 대한 주제로 연구되어 왔다^[4]. 한국에서 NHL을 문화재에 적용한 사례로는 북한 진파리 고분벽화의 응급처리^[1]가 있으며, 2013년에는 유럽에 적용된 사례를 중심으로 고대문화재 보수재료써 NHL을 소개하는 연구결과가 있었다^[5]. 또한 2014년에는 고분벽화의 벽체 보강을 위한 NHL의 특성에 대한 연구가 이루어졌으며^[6], 2016년에 연구에서 국외에서는 이미 천연 수경성 석회를 문화재와 역사적 건축물, 전통적 건축물에 적용하여 사용하고 있으나 국내에서는 NHL을 문화재에 적용 가능한 전통기술로써의 재해석은 이루어져 있지 않은 실정임을 밝히기도 하였다^[7]. 이후 2018년 가야시대 고분벽화의 벽체 보강을 위해 NHL과 폐각 및 폐분을 혼합하여 제작된 보강제의 물성에 대한 연구가 이루어져 고분벽화 보강제로써 NHL의 가능성을 확인할

수 있었다⁶⁾. 앞서 이루어진 연구결과에 따르면 NHL은 고습한 환경에서도 안정적인 경화가 가능하고 낮은 밀도와 함께 충분한 경화시간을 확보할 수 있어 보존처리 작업에 용이성을 갖는 등 고분벽화 벽체 보강제로써 많은 장점을 지닌 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 고분벽화 실제 적용에 있어 검증의 한계성이 존재하고 실질적인 처리 기술에 대한 어려움이 있어 현재까지 문화재에 적용하기 위한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 NHL을 사용하여 제작한 벽체 보강제 시료에 대한 경화특성 및 물성을 평가하여 고습한 환경특성에 사용 가능한 고분벽화 벽체 보강제의 적용성을 고찰하였다.

II. 재료 및 연구방법

1. 재료선정

본 실험에서는 석회는 천연 수경성 석회와 생석회를 각각 사용하였다. 천연 수경성 석회(NHL5, St.Astier, USA)는 해외 문화재 복원에 널리 쓰이는 제품이며, 생석회는 괴타입의 고품위 석회인 생석회(Calcium oxide(CaO 85%이상), 백광소재, Korea)를 전통적인 소화방법을 통해 소석회(Calcium hydroxide, Ca(OH)₂)화 하여 사용하였다.

표 1. 재료 별 구성성분

sample	Chemical name	Concentration (%)
NHL5	Calcium Oxide	< 1
	Calcium Dihydroxide	15-65
	Calcium Carbonate	10-40
	Calcium Silicate	10-45
	Aluminum Oxide	0.5-5
	Silica, Crystalline	7-13
	May also contain Magnesium oxide, Potassium oxide, Sodium oxide, Ferric oxide, ...	< 1
생석회	Calcium Oxide	> 85

2. 연구방법

고분벽화 벽체 보강제의 특성을 파악하기 위해 다양한 조건의 의사 시료를 제작하여 물성을 비교 평가하였다. 먼저 실험에 사용되는 주재료인 생석회와 NHL을 각각 실험체로 제작하여 경화속도를 측정하였다. 그리고 고분벽화 벽체 보강제로써의 적용성 평가를 위해, 고분벽화 벽체 의사시료 및 NHL을 혼합한 보강제 시료를 제작하여 경화특성을 파악하고 다양한 물성에 대한 비교 분석을 실시하였다.

2.1. 의사 시료 제작

시료는 생석회와 NHL을 주재료로 하여 고분벽화 벽체 의사시료 및 벽체 보강제 의사시료 조건으로 제작하였다(표 2). 먼저, 고분벽화 벽체 의사시료는 과학적 조사가 이루어진 고구려 고분벽화를 대상으로 벽체 제작 관련 연구를 통해 제작기법 및 성분, 특성을 파악하였다^{9,10)}. 그리고 진파리 및 하해방 고분 벽체 관련 연구를 중심으로 고분벽화 벽체 의사시료를 제작하였다. 시료는 선행된 연구를 통해 전통적인 석회 소화법으로 생석회 소화 후 10% 모래를 첨가한 모르타르로 제작하였다^{11,12)}. 벽체 보강제는 총 7개의 조건으로 이루어져 있으며 먼저 고분벽화 벽체 의사시료의 물성과 순수한 NHL의 물성을 비교하기 위한 조건(Group 3-1)을 제작하였다. 그 외 조건의 경우 NHL의 혼합여부와 모래의 혼입량의 차이에 따라 보강제를 제작하였다. 모든 조건의 시료들은 50×50×50 mm의 Mould 및 Ø100×15 mm의 Petri-dish에 다짐하여 채워 넣고 고분환경과 유사한 25℃, 98% RH에서 양생하였으며, 1일 후 탈형하였다.

표2. 제작된 의사 시료 분류

Sample type		Remarks	
Group 1 (Material)	Calcium oxide	-	
	Natural hydraulic lime		
Group 2 (Wall sample of tomb mural)	Lime : Sand (9 : 1)	25℃, 98% RH Curing Mould 50×50×50 mm Petri-dish Ø100×15 mm	
Group 3 (Reinforcing agent sample)	1		NHL 100%
	2		NHL : Sand (1 : 1)
	3		NHL : Sand (1 : 2)
	4		Group 2 : Sand (1 : 1)
	5		Group 2 : Sand (1 : 2)
	6		NHL+Group 2 : Sand {(1 : 1) : 1}
7	NHL+Group 2 : Sand {(1 : 1) : 1}		

2.2. 경화 특성 평가

고습한 조건에서 고분벽화 벽체 및 보강제를 구성하는 주재료의 경화 특성을 파악하기 위해 비카트칩 시험기(ASTM C 807, Mesys, Colombia)를 이용한 경화특성 분석을 실시하였다(KS L 5108). 생석회 및 NHL을 사용하여 시료를 제작하였으며 대조군으로써 수경성 석회(HL, Hydraulic Lime)로 제작한 시료를 함께 비교하였다.

2.3. 벽체 보강제 적용성 평가

고분벽화 벽체 보강제로써 적합한 특성을 확인하기 위해 치수 안정성 및 강도 등의 물성을 평가하였다. 고분벽화 벽체 의사 시료 조건인 Group 2와 보강제 조건인 Group 3의 비교를 통해 보강제로써 NHL의 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 평가는 육안관찰, 색도를 측정하는 표면조사와 치수 안정성 및 강도측정을 통한 물성평가를 실시하였다.

1) 표면조사

① 육안관찰

시료 제작 당시 및 양생 기간(7일, 28일, 84일)에 따라 보강제 조건별 육안관찰을 실시하였으며 색 변화 차이와 균열 및 수축 등의 물리적인 변화양상을 확인하고자 하였다.

② 색도

양생 기간(7일, 28일, 84일)에 따라 보강제 조건별 색도 측정을 실시하였으며 색도계(CR-400, Konica Minolta, Japan)를 이용하여 시료별 3 points의 평균값으로 측정하였다. 시료의 양생 기간에 따른 백색도를 비교하고, Group 2를 기준으로 하여 양생 기간별 색차값을 비교하였다. 결과값은 CIE L*a*b* 색 공간에 의거하여 구하였다.

2) 물성평가

① 치수안정성

양생 기간(7일, 28일, 84일)에 따른 보강제 조건별 치수안정성은 디지털 버니어 캘리퍼스(Digital vernier calipers, Korea)를 이용하여 시료 각각의 0°, 120°, 240°에서 길이를 측정하고 평균값을 계산하여 수축률을 구하였다.

② 압축강도

양생 기간(7일, 28일, 84일)에 따라 보강제 조건별로 발현된 강도를 측정하기 위해 만능재료 시험기(AGS-100NJ Table-top type, Shimadzu, Japan)를 사용하여 압축강도를 측정하였다(KS L 5105). 제작 7일 이후 1차 측정하였으며, 일반적인 석회의 재령 기간에 따라 28일과 84일 차에 2, 3차 평가를 실시하였다. 강도 측정은 상온에서 2시간 건조 후 10 mm/10 min의 강도로 실험을 진행하였으며 시료 3개의 평균결과로 압축강도 값을 구하였다.

III. 결과

1. 경화 특성 평가

경화 특성 평가 결과 경화 속도는 HL이 약 24시간으로 가장 빠른 것으로 나타났으며 생석회를 소화시킨 소석회(Slaked lime)의 경우, 표면은 경화된 것처럼 보였으나 2달이 경과한 후에도 초결 및 종결이 발생되지 않았다. NHL은 경화까지 약 48시간이 경과하였으며 대략 24시간 후 초결이, 48시간 이내에 종결이 일어난 것으로 측정되었다(표 3).

표3. 경화특성 평가 결과

No	Type	Curing time	Remarks
1	Slaked lime	Not hardened	25℃ 98%RH
2	HL	1 day	
3	NHL	2 days	

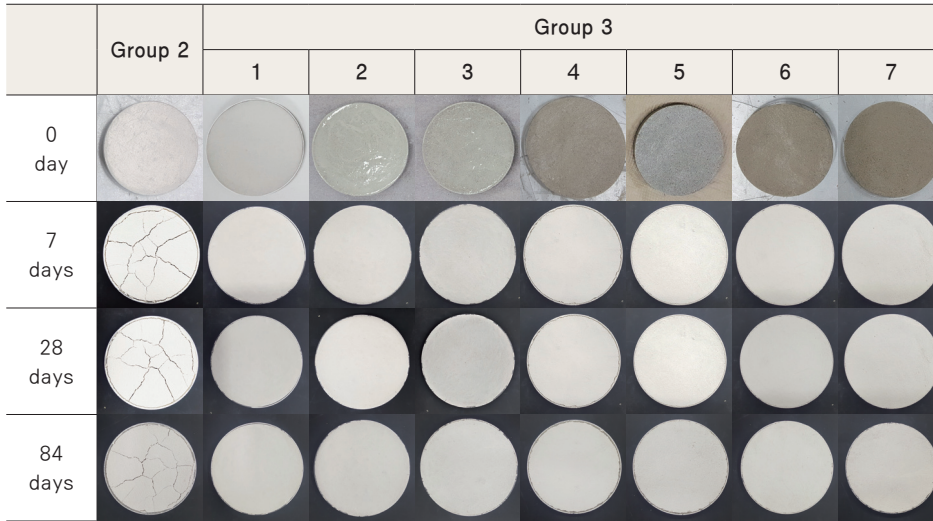
2. 벽체 보강제 물성 평가

2.1. 표면조사

1) 육안관찰

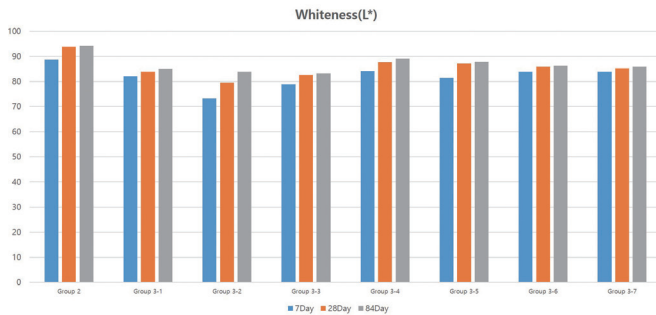
육안관찰 결과 시료 양생 7일 후 전체적으로 백색도 증가가 나타났으며, 모든 조건 중 Group 2 조건에서만 균열이 확인되었다. 또한 NHL를 혼합하지 않은 Group 3-5, 6 조건의 경우 수축 현상이 관찰되었다. 재령 28일과 84일의 시료에서는 양생 7일 차에 비해 육안 상 큰 변화가 확인되지 않았다(표 4).

표4. 양생 기간에 따른 조건별 육안관찰 결과

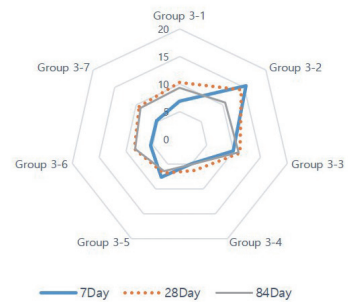


2) 색도

모든 조건에서 양생 기간이 경과함에 따라 백색도(L*)가 증가하는 경향을 보였으나, 모래의 함량이 높은 조건일수록 백색도가 저감하는 현상을 확인할 수 있었다. Group 2 조건이 가장 높은 백색도 값을 나타냈으며 상대적으로 Group 3-1, 2, 3 조건의 경우에 더 낮은 백색도 값을 확인하였다(도 1). 또한 Group 2 조건을 기준으로 하여 측정된 색차 결과, Group 3-5, 6 조건이 가장 낮은 색차 값을 가지는 것으로 나타났다. 모든 시료의 색차 값은 평균적으로 양생 7일에서 28일까지는 기간이 증가함에 따라 값이 높아지는 경향이 나타났으나 28일에서 84일 경과 후에는 양생 기간이 증가함에 따라 색차 값이 낮아지는 경향이 나타났다(도 2).



도1. 양생 기간에 따른 조건별 백색도 측정 결과.



도2. 양생 기간에 따른 조건별 색차 비교 결과.

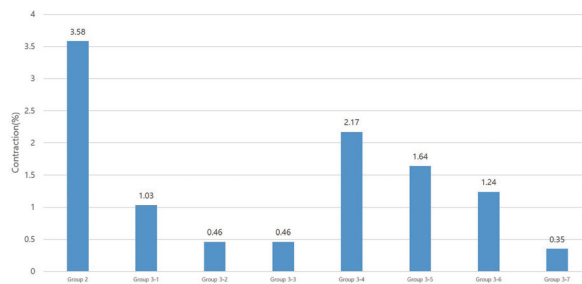
표5. 양생기간에 따른 조건 별 색도 및 색차

chromaticity sample type	7Day				28Days				84Days			
	L*	a*	b*	ΔE*	L*	a*	b*	ΔE*	L*	a*	b*	ΔE*
Group 2	88.76	0.67	5.84	0	93.79	0.45	4.50	0	94.21	0.10	4.61	0
Group 3-1	81.99	0.23	6.80	6.85	83.91	0.74	7.24	10.26	85.00	0.15	5.79	9.29
Group 3-2	73.28	0.05	5.95	15.49	79.54	0.10	6.30	14.37	83.83	0.26	6.32	10.52
Group 3-3	78.85	0.14	4.90	9.97	82.56	-0.16	4.49	11.25	83.17	-0.12	4.11	11.05
Group 3-4	84.21	0.60	7.89	4.99	87.70	0.32	6.11	6.30	89.17	0.22	5.50	5.12
Group 3-5	81.34	0.78	7.79	7.67	87.21	-0.13	6.20	6.82	87.81	0.16	5.48	6.46
Group 3-6	83.89	0.21	8.08	5.38	85.80	0.29	6.91	8.35	86.30	-0.20	7.00	8.26
Group 3-7	83.90	0.10	7.89	5.31	85.13	0.41	8.00	9.34	85.89	0.19	8.12	9.03

2.2. 물성평가

1) 치수안정성

치수안정성 평가 결과 균열이 발생된 Group 2 조건이 3.58%의 수축률로 가장 높은 값을 나타냈으며, 균열이 발생되지 않은 조건 중 Group 3-4 조건이 2.17%로 가장 높은 수축률이 확인되었다. 또한 Group 3-2, 3 조건의 경우 0.5% 이하의 낮은 수축률을 확인할 수 있었으며 Group 3-7 조건이 0.35%로 가장 낮은 값을 나타냈다(도 3, 표 6).



도3. 양생 기간에 따른 조건별 수축률 측정 결과.

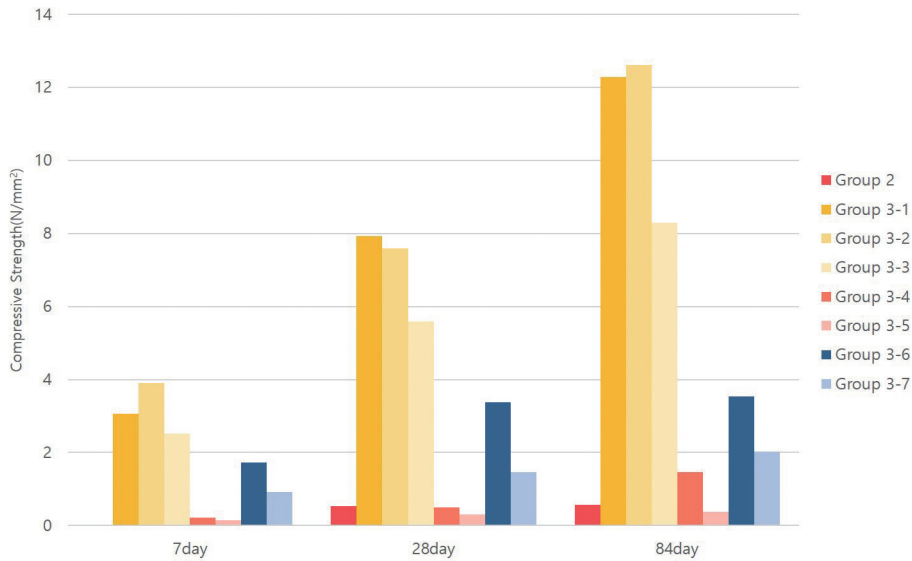
표6. 양생기간에 따른 조건 별 수축률

sample type	Contraction
Group 2	3.58
Group 3-1	1.03
Group 3-2	0.46
Group 3-3	0.46
Group 3-4	2.17
Group 3-5	1.64
Group 3-6	1.24
Group 3-7	0.35

2) 압축강도

압축강도 측정 결과, 모든 조건에서 양생 기간이 증가할수록 강도 값이 증가하는 경향이 나타났으며 모래의 혼입량이 증가함에 따라 강도가 약화되는 양상이 확인되었다. Group 2 조건은 양생 7일 차에는 탈형이 되지 않아 측정 불가하였지만 28일, 84일의 기간 동안 경화 가능성을 확인하였으며 1 N/mm² 이하이나 강도가 증가하는

양상이 확인된다. 또한 고습환경 하(98%RH) 양생 84일 차에 측정된 강도 값은 0.56 N/mm²으로 낮은 값을 나타냈으나 공기 중에서 건조시켰을 경우 1.55 N/mm²로, 고습 환경 하 양생에 비해 3배 정도 높은 값이 측정되었다. Group 3-1, 2, 3의 조건은 양생 기간이 증가할수록 강도 값이 증가하는 양상을 보이며 그 폭이 약 3배 이상 확인된다(도 4, 표 7).



도4. 양생 기간에 따른 조건별 압축강도 측정 결과.

표7. 양생 기간에 따른 조건별 압축강도 측정 결과

chromaticity sample type	7 days				28 days				84 days				
	1	2	3	Average (N/mm ²)	1	2	3	Average (N/mm ²)	1	2	3	Average (N/mm ²)	
Group 2	-	-	-	-	0.51	0.55	0.53	0.53	0.63	0.50	0.55	0.56	
Group 3	1	3.01	3.09	3.07	3.06	7.65	7.70	8.40	7.92	11.31	12.86	12.66	12.28
	2	3.83	3.91	3.99	3.91	7.83	7.61	7.33	7.59	13.50	12.27	12.07	12.61
	3	2.56	2.43	2.54	2.51	5.27	5.48	6.03	5.59	7.50	8.68	8.70	8.29
	4	0.16	0.30	0.17	0.21	0.48	0.49	0.49	0.49	1.76	1.53	1.12	1.47
	5	0.23	0.10	0.10	0.14	0.31	0.29	0.30	0.30	0.38	0.39	0.37	0.38
	6	1.72	1.66	1.82	1.73	3.42	3.36	3.36	3.38	3.47	3.78	3.37	3.54
	7	0.91	0.93	0.89	0.91	1.60	1.41	1.38	1.46	1.89	2.38	1.79	2.02

IV. 고찰 및 결론

수경성 특성을 지닌 NHL을 이용하여 벽체 보강제를 제작하였으며, 손상된 고분벽화의 벽체에 적용할 수 있는 보강제 조건에 따른 물성 실험 및 평가를 실시하였다.

먼저, NHL 및 생석회를 원료로 하는 시료의 경화특성 평가 결과, 98%RH의 고습조건에서 소석회 반죽은 경화되지 않았으며, HL 반죽은 약 24시간, NHL 반죽의 경우 약 48시간에 경화된 것으로 확인되었다. 일반적인 소석회는 수산화칼슘이 이산화탄소와 반응하여 탄산칼슘으로 변하는 기경성 재료로서 고습한 환경에서는 경화가 어렵다. 하지만 HL 및 NHL은 수경성 광물인 규산석회($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)와 알루미늄석회($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)가 소량 함유되어있어 포졸란 반응을 통해 고습조건에서도 경화가 가능하고 강도 또한 향상된다.

다음으로 고분벽화 벽체 조건으로 제작된 Group 2 시료와 벽체 보강제 조건인 Group 3 시료들에 대한 표면조사 결과, Group 2 시료는 경화됨에 따라 균열이 심화되어 시료가 분리된 양상이 확인되었다. Group 3 시료들은 육안관찰 상 균열 등과 같은 손상은 없었으나 각 시료들 간에 있어 색도 차이가 발생되었다. 시료에 혼합된 소석회에 비해 NHL의 양이 높을수록 백색도가 감소한 것으로 미루어볼 때, NHL이 시료의 백색도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. Group 2 시료를 기준으로 한 Group 3 시료들의 색차를 평가한 결과, NHL의 혼합량이 많을수록 백색도(L^*)는 낮아지고, 모래의 혼합량이 높을수록 황색도(b^*) 또한 높아지는 양상이 확인되었다. 특히 소석회를 혼합하지 않고, NHL과 모래만을 혼합한 Group 3의 1, 2, 3 시료가 색차값이 가장 높은 것으로 보아 모래에 비해 NHL의 혼합량이 색차에 보다 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 석회 벽체의 보강제로써 NHL 단일 재료의 사용은 원 벽체 색상과의 유사성 측면에서 고려해야 할 점으로 사료된다.

보강제 조건인 Group 3 시료들에 대한 치수안정성 평가 결과, NHL을 혼합한 Group 3의 1, 2, 3, 6, 7 시료의 경우 NHL을 혼합하지 않은 Group 3의 4, 5 시료들에 비해 낮은 수축률을 나타냈으며, Group 2 조건에 NHL을 1:1로 혼합하고, 그 반죽을 다시 모래와 1:2 비율로 혼합한 Group 3의 7 시료가 수축률이 가장 적은 것으로 확인되었다. 이는 건조수축 변이에 의한 균열이 적은 NHL 미립자에 의한 영향 및 혼합된 수산화칼슘의 증가로 인해 탄산화 반응이 늦어지면서 생성되는 탄산칼슘 결정의 입도가 작아져 생기는 영향으로 판단된다^[4].

강도 측정 결과, Group 3 조건의 1, 2, 3 시료의 경우 8.29~12.61 N/mm^2 로서, Group 2와 비교하여 약 8배 ~ 12배 이상 높은 강도를 나타냈다. 이는 고구려 벽화 고분인 진파리 고분벽화 벽체 추정 시료 압축강도인 11~23 N/mm^2 ^[13]와 일부 유사

한 값을 보인다. 금번 강도측정 실험에 사용된 시료는 최대 84일간의 양생기간을 거친 조건으로써, 양생기간에 따른 NHL의 강도 발현 특성을 감안할 때, NHL을 혼합한 시료들의 양생기간이 더 길어진다면 강도가 더욱 증가 될 것으로 추정된다. 따라서 NHL을 주재료로 하는 보강제의 경우, 고분벽화 벽체에 적용된 후 종결되는 시점에서 석회 벽체보다 더 큰 강도를 갖게 되어 벽체와 보강제간 물성차이를 나타낼 것으로 판단된다.

모든 시료들은 NHL 혼합량이 증가할수록 강도가 높았으며, 소석회 및 모래의 혼합량이 증가할수록 강도는 저감되는 양상이 확인되었다. 이는 경화에 기여하는 NHL의 함량에 비해 초기수화반응속도가 빠른 규산 석회 또는 알루미늄 석회의 함량이 높아 탄산화되는 NHL 양을 저감 시키고, 수산화칼슘의 혼합 양이 많아짐으로써 탄산칼슘 결정성을 저하시키는 영향인 것으로 판단된다.

실험 결과를 종합 고찰하면 다음과 같다. 고분 내부와 같이 고습한 환경에 적용되는 벽체 보강제 재료로써 NHL이 사용될 경우 경화 효과는 물론 경화시간에 따른 벽체 보강작업 시간 또한 확보될 것으로 판단된다. 그러나 NHL을 주재료로 하는 보강제의 조건은 석회 벽화 벽체에 비해 너무 높은 강도를 지닐 수 있으며, 이 경우에는 벽체와의 물성 차이로 인해 보강제로써의 안정성이 떨어질 수 있다. 또한 색차측정 결과에서도 NHL의 혼합량이 높을수록 백색도가 떨어지는 단점이 확인되었다. 그러나 고분벽화 벽체 특성을 지닌 벽체 의사시료 재료를 NHL과 혼합한 보강제 시료 조건에서는 고습환경에서 경화 및 강도발현이 가능하고 백색도가 높으며 또한 너무 강한 물성을 갖지 않으므로 고분벽화 벽체 보강제로써의 여러 장점이 있는 것으로 확인되었다.

연구 결과, 손상된 고분벽화 벽체의 보강을 위해서는 원 벽체 조건과 천연 수경성 석회의 물성 및 재료 특성을 고려하여 보강제를 사용할 필요가 있는 것으로 판단된다. 향후 다양한 조건에 따른 고분벽화 벽체 보강제에 대한 Pilot test 연구가 이루어진다면 보다 효과적이고 안정적인 보존처리가 가능할 것으로 사료 된다.

참고문헌

1. 남북역사학자협의회·국립문화재연구소, *남북 공동 고구려 벽화고분 보존연구 보고서*, 사)장애우권익문제연구소, 서울, (2007).
2. 한경순, 공주 송산리 6호분 벽화의 제작기술 고찰, *보존과학회지*, **27(4)**, (2011).
3. 이화수·이한형·이경민·한경순, 대가야 고아동 고분벽화 제작기술에 관한 연구, *보존과학회지*, **30(4)**, (2014).
4. 조진상, *천연 수경성 석회를 이용한 페이스트 및 모르타르의 물리화학적 특성*. 강원대학교 대학원 지역기반공학과, 박사학위논문, (2013).
5. 조진상·조계홍·문기연, 고대문화재 보수재료로서 천연수경성 석회(유럽에서의 적용사례), *석회*, **118(1)**, (2013).
6. Han, K.S., 2014, Study for the conservation of Acient Mural in korea : natual hydronic lime mortar for the tratment of Gogureo Murals. Mural paintings forum of shaanxi History Museum, shaanxi, October 16-17, 121-125.
7. 이상옥, *조선시대전통灰의 제작기술*, 한국전통문화대학교 문화유산융합대학원 수리복원학과 복원전공, 석사학위논문, (2016).
8. Haw Soo Lee·Yeong Gyeong Yu·Kyeong Sun Han, Mortar Characteristics for Reinforcement of Ancient Tomb Murals Using Oyster Shells, *보존과학회지*, **34(4)**, (2018).
9. 이상수·안병찬, 고구려벽화 제작기법 試考, *고구려발해연구*, **5**, (1998).
10. 안병찬, 高句麗 高墳壁畫의 製作技法 研究: 비탕벽 제작기법을 중심으로, *고구려연구*, **16**, (2003).
11. 송응성, *천공개물(역 최주)*, 전통문화사, 서울, (1997).
12. 이화수, 고구려 고분벽화의 석회마감층에 관한 연구, 경주대학교 대학원 문화재학과, 석사학위논문, (2005).
13. 임권웅, 고구려 고분벽화 회벽체의 재료학적 특성에 관한 연구(진파리 4호분 회벽체를 중심으로), *동북아역사논총*, **34**, (2009).