토벽화 균열부 보강에 사용되는 충전제 적용 연구

이경민 | 이화수* | 한경순**,¹

국립문화재연구소 문화재보존과학센터, 한국전통문화대학교*, 건국대학교**

Study on Application of Filling Material for Reinforcement of Soil Murals in Buddhist Temple

Kyeong Min Lee | Hwa Soo Lee* | Kyeong Soon Han**,¹

Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

*Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 323-812, Korea

**Konkuk University, Chungju, 380-701, Korea

¹Corresponding Author: conservation@kku.ac.kr, +82-43-840-3677

초록 문화재의 손상 부위를 대상으로 하는 보존 처리는 원 유물의 재료와 유사한 물질로 복원하고 재처리가 가능하도록 해야 한다. 흙으로 구성된 우리나라의 사찰 벽화는 연질의 재질적 특성을 지니고 있는데, 그간 벽화의 균열과 박락 부위 보강에 사용되는 충전제(메움제)에 관한 연구들이 진행되었고, 전통 재료 활용의 적합성이 여러 연구 결과를 통해 밝혀졌다. 그러나 현재 이러한 연구 결과만을 가지고 사찰 벽화 보존 처리 현장에서 적용하기에는 몇 가지 제한점이 있다. 이는 충전제의 물리적 특성 연구가 부족하였으며 실제 보존 처리 시 요구되는 다양한 혼합 비율에 대한 규격이 마련되어 있지 않다는 점이다. 본고에서는 토벽화 충전제의 물리적 특성을 파악하기 위하여, 1 차 실험은 토양 혼합비 및 유기 매제를 달리한 12 조건의 의사시료를 제작하여 비교 분석을 실시하고, 2 차 실험은 1 차 실험에서의 안정적인 조건의 결과를 토대로 실제 보존 처리 대상의 벽체 조건에 맞는 충전제를 제작 및 테스트 후 보존 처리에 적용하였다.

중심어: 사찰벽화, 충전제, 토양, 모래, 황토, 점토, 도박풀

ABSTRACT The conservation of damaged object should be restored by the similar material with the original and they have to reversibility as possible as. The characteristics of Buddhist mural paintings composed of clay are with soft material. So far, there have been a number of researches done on filling material that reinforces cracks and exfoliation of mural painting. Based on the application of traditional materials, it was found that they are appropriate to various applications. However, only based on those research results, there are some constraints to the application in the field. In addition, there has been only a few researches done on physical characteristics of filling materials. A major issue is that there is not any standard established on various mixing ratio, which is required for treatment of mural painting. This study was carried out to understand the physical characteristics of filling materials on clay mural painting. The 1st test was conducted to analyze test specimen in twelve different conditions by varying soil mixing ratio and organic medium. The 2nd test was conducted to manufacture filling materials appropriate to the mural painting, based on the result of stable condition from the 1st test, and which was applied to treatment in field.

Key Words: Buddhist mural painting, Filling material, Soil, Sand, Loess, Clay, Seaweed adhesive

1. 서론

국내 사찰 벽화 보존 처리에 대한 특징을 시기적으로 구분 지으면 1980년대 초까지는 주로 전각의 해체 보수를 목적으로 벽화의 보수가 이루어졌으며, 1980년대 후반부터는 손상된 벽화의 복원이 활발히 수행되었다. 2000년대 이후부터 현재까지는 보다 체계적인 보존처리와 함께 학술 연구가 병행되었고, 과거 보수된 벽화에 대한 재처리 등 발전적 성격을 띠는 연구가 이루어졌다. 연구 현황을 살펴보면, 2000년대 이후에 발표된 벽화 보존 관련 연구 중 보존 이론 및 보존 현황 관련 연구가 16건이고 벽화의 재질 분석 및 조사 연구가 9건인데, 보존 처리 재료 및 기법에 대한 연구는 7건으로써 다른 분야에 비하여 상대적으로 부족한 편이다(Lee, 2013).

사찰벽화는 벽체를 구성하는 물질이 지닌 무기질의 친수성(hydrophilic)과 그리고 흙벽면의 높은 유공성(porosity)의 특성상, 보존 처리 재료의 적용에 신중함이 따른다(Han, 2002). 보존 처리는 토벽화의 재질에 적합한 재료를 사용해야 함은 물론, 같은 재료를 사용하더라도 손상 상태 및 경우에 따라 달리 적용될 수 있음을 고려해야 한다. 특히 벽화 보강에 적용되는 충전제는 가급적 제작 당시에 사용된 것과 유사한 전통 재료를 사용하는 것이 이상적일 것이다. 그러나 전통 재료를 사용한 제작 방법이나 물성에 대한 기초 연구 자료가 부족한 실정이고, 현재에도 명확한 기준 없이 현장에서 사용되고 있기에 이에 대한 연구가 절실히 요구되는 실정이다.

기존 사찰 벽화 보강용 충전제 관련 연구는 먼저, 토양을 사용한 충전제에 도박(Pachymeniopsis elliptica YAMADA) 풀을 사용할 때 다른 유기 매체에 비해 안정적인 결과를 확인한 연구가 있었으며(Kim *et al.*, 2008), 도박풀이 혼합된 황토를 건조 및 분쇄한 충전제를 분석하여 현장에서의 도박풀 사용성을 높이는 방안을 제시하기도 하였다(Han *et al.*, 2009). 그리고 2010년 이후 수행된 벽화 보존처리에서는 토양과 도박풀을 사용하여 보존처리 전 테스트를 거친 후 적용하고 있다(Hanrim Conservation and Technology, 2008; Baekje Cultural Heritage Conservation Institute, 2010). 그러나 토양 보강제에 대한 관련 시험 규격이 없고, 보존 처리 현장마다 다양한 조건의 재료에 대한 특성을 파악하기에는 현실적으로 한계가 있다.

이에 본고에서는 토양과 매제를 조건별로 혼합한 벽체 보강용 충전제에 대한 실험을 실시하였으며, 이는 현장에

서 안정적인 충전제를 제작하는데 활용할 수 있는 효과적인 정보를 제시하고자 하는데 중점을 두고 연구를 수행하였다.

연구는 2차에 걸쳐 실험을 실시하였으며, 1차 실험에서는 토양 배합비와 유기 매제를 달리한 12조건의 의사시료를 제작하여 물리적 특성을 비교 분석하였다. 의사시료는 토양의 입도분석을 통해 물성을 파악한 후, 점토, 황토, 모래 그리고 유기 매제의 혼합 조건을 달리하였으며, 제작된 의사시료는 표면 상태 및 길이 변화 관찰, 강도 측정, 침수 시험, 초음파 속도 측정 등 4종의 실험을 각각 실시하였다. 2차 실험에서는 실제 보존 처리에 앞서 1차 실험 결과와 보존 처리 대상 재질 분석 결과를 토대로 현장에서 적용 가능한 충전제 테스트를 실시하였다.

2. 충전제 특성 연구

2.1. 1차 실험

시험은 점토와 황토 그리고 모래를 사용하여 혼합비와 조건을 다양하게 설정 후 의사시료를 제작하고, 보존 처리에 사용되는 유기 매제인 도박, 전분, 아크릴 퍼티를 혼합하여 의사시료를 제작하였다. 의사시료는 건조 과정의 길이 변화와 표면 상태를 관찰하고 입자 결합 상태와 유기물의 작용에 대해 형태적 변화를 미시적으로 관찰하였다. 또 초음파 탐사와 강도 테스트를 실시하여 물리적 특성을 파악하고 투수 시험을 통하여 보강제의 내수성을 파악하였다.

2.1.1. 의사시료 제작

의사시료의 재료는 사찰 벽화 벽체를 구성하는 기본 물질인 황토, 점토, 모래를 사용하였다. 모래는 강모래, 황토는 산에서 채취한 분급도가 높은 토양을 사용하고, 점토는 도자기 제작에 널리 사용되는 청자토를 사용하였다. 의사시료 제작용 토양은 한국산업규격(KS)에서 정하는 입도분석시험(KS F 2302)법에 따라 105℃에서 24시간 건조한 후 분쇄하여 전체 무게를 측정하고, 체가름입도분석시험기(Analysette 3, FRITSCH, Germany)를 이용하여 분급하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 체를 통과시켜 잔류된 토양 입자의 누적백분율을 구하여 분급에 따라 정량을 개량하여 의사시료 제작에 사용하였다. 의사시료는 각 토양의 혼합비와 첨가물을 달리하여 총 12종을 제작하였으며 제작 조건은 Table 2와 같다.

Table 1. Degree of sorting of Samples for production.

Sieve Number	10	18	35	60	200	325
Sieve opening	2000	1000	500	250	75	45
particle size classification	coarse sand	very coarse sand	medium sand	fine sand	very fine sand	silt
Clay(%)	-	-	-	54	40	6
loess(%)	12	-	40	40		8
Sand(%)	1.56	-	55	43		0.1

Table 2. List of Samples.

Sample	Condition of mixture	Medium	Additive
F-1	clay only	-	-
F-2	loess only	-	-
F-3	sand only	-	-
F-4	clay : sand = 1:2	-	-
F-5	clay : sand = 1:1	-	-
F-6	clay : sand = 2:1	-	-
F-7	loess : sand = 1:2	-	-
F-8	loess : sand = 1:1	-	-
F-9	loess : sand = 2:1	-	-
F-10	loess : sand = 1:1	seaweed in water 5%	hemp
F-11	loess : sand = 1:1	starch in water 5%	hemp
F-12	loess : sand = 1:1	acrylic putty in water 5% (TERRACO KOREA(63495))	hemp

Table 3. Size and conditions according to the test.

Test	Size	Sample
Measure of size	139.5 × 15.4 mm Growth Area 148 cm ²	F-1 ~ F-12
Measure of strength	35 × 70 × 70 mm (WDH)	F-1 ~ F-12
Waterlogging Test	35 × 70 × 70 mm (WDH)	F-1, -2, -8, -10, -11, -12
Ultrasonic flaw detecting	350 × 200 × 75 mm (WDH)	F-1 ~ F-12

의사시료는 길이 변화 측정용, 강도 측정용, 침수 시험용, 초음파 탐사용 총 4종류의 시험에 따라 규격을 달리하여 제작하였다(Figure 1, 2). 충전제의 건조 과정에서 발생하는 수축에 대한 길이 변화 측정용은 Petri Dish (150 × 20mm)에, 강도 측정용은 직사각형 몰드에 Table 1의 의사시료 제작 조건에 따라 12종을 제작하였으며 6주간 상온에서 양생하였다. 내수성 테스트를 위한 침수 시험용 의사시료 제작 조건에서 F-1, F-2, F-8, F-10, F-11, F-12 총 6종을 제작하였으며 강도 측정용과 같은 직사각형 몰드에 제작하여 상온에서 6주간 양생하였다. 초음파 탐사 의사시료는 중벽 층까지 제작된 벽체 위에 마찬가지로 의사시료 12종을 덧발라 제작하였으며 역시 상온에서 6주간 양생하였다. 각 시험 별 의사시료의 규격 및 조건은 다음과 같다(Table 3).

2.1.2. 분석 및 조사

건조 완료된 의사시료의 수축에 따른 길이 변화는 디지털 버니어캘리퍼스(MAHR, CD-20CPX, Germany)를 이용하여 정밀 측정하였다. 의사시료가 원형이므로 시계의 12시를 기준으로 0°, 120°, 240°를 측정하였다.

충전제의 유기 매체 혼합에 따른 응결체 형성 및 조직 상태의 조사를 위하여 주사전자현미경(SEM, Hitachi S-2300, Japan)으로 미세 조직 관찰을 실시하였다. 미세 조직 관찰은 유기 매체 혼합군인 의사시료(F-10, F-11, F-12)이며, 대조군으로써 유기 매체를 혼합하지 않은 의사시료(F-8)와 비교하였다.

보강제의 밀도와 탄성계수 및 강도에 대하여 간접적인 자료를 구축할 수 있는 초음파 속도 측정은 간접법(Indirect

Testing)으로 측정하였다. 의사시료에 200mm 간격으로 정방향 형태로 구획하여 각 구획 면적 당 8지점을 측정하였으며, 측정 시, Probe 간격은 100mm로 설정하였다. 측정 장비는 Q-see man inter'l의 Ultracon-170을 사용하였고 표준 편차를 낮추고 효과적인 발·수신을 위해 Probe는 54kHz의 압전체를 사용하였다.

충전제의 혼합비에 따른 내구성을 조사하기 위해 만능 재료시험기(Universal Testing Machine, Hildbrand MICRO-IRHD-1, Germany)를 이용하여 KS F 2405 규격에 준하여 압축강도를 측정하였다. 시험 조건은 온도 23℃와 습도 50% 하에서 5mm/min의 속도로 의사시료의 수직 방향으로 압축하였다.

충전제의 혼합비 또는 유기 매체 혼합 여부에 따른 내수성을 검토하고자 침수 시험을 실시하였다. 의사시료를 500mL 비이커에 넣고 증류수를 150mL 주입한 후 물의 함수 정도와 48시간 동안 시간 경과에 따라 나타나는 의사시료의 변화를 관찰하였다.

2.2. 1차 실험결과

2.2.1. 표면 관찰 결과

Petri Dish에 제작한 의사시료의 건조가 완료된 표면 상태를 육안 관찰한 결과, 혼합비에 따라 각기 다른 길이 변화를 나타냈으며 균열 현상이 나타나지 않고 자연스럽게 수축하였다. 대부분 의사시료의 표면은 매끄러운 상태였으며, 특히 점토와 황토 의사시료의 표면은 치밀하고 매끈한 상

태를 보였다. 반면, 모래 혼합이 두 배인 의사시료(F-4,-7)는 다소 거친 표면을 나타내었고 모래 혼합이 50%인 의사시료(F-5,-8)는 다른 의사시료 표면과 유사하였다. 보다 미세한 상태 조사를 위해 디지털 현미경으로 관찰한 결과, 점토 의사시료(F-1)보다 황토 의사시료(F-2)의 표면이 다소 거친 것을 확인할 수 있었다. 모래 혼합이 2배인 의사시료(F-4,-7) 표면이 가장 거칠게 나타났고, 모래가 50%인 의사시료(F-5,-8,-10,-12)는 모두 유사한 형태를 나타내었다.

같은 혼합 조건이지만 벽체 표면에 발라서 제작한 의사시료에서는 다양한 균열 현상이 나타났다. 점토 의사시료(F-1)에는 미세 균열들이, 황토 의사시료(F-2)에는 비교적 크고 깊은 균열들이 발생하였다. 점토 혼합비가 2배인 의사시료(F-6)에도 많은 균열이 발생하였으며 모래 혼합이 50%인 의사시료(F-5)는 부분적으로 균열이 발생하였다. 황토와 모래 혼합이 1 : 1인 의사시료(F-8)에서는 균열이 발생하지 않았다. 유기 매체 혼합군에서는 균열이 없었으며 유기 매체 종류에 따라 약간의 색상 차이가 나타났다.

2.2.2. 길이변화 측정 결과

의사시료의 길이 변화는 점토 의사시료(F-1)가 5.4%, 황토 의사시료(F-2)가 5.6%로 가장 큰 변화를 나타내었다(Figure 3, 4). 다음으로는 점토와 모래가 각각 1 : 1, 2 : 1 비율로 혼합한 의사시료(F-5,-6)에서 평균 4.4%의 변화를 보였다. 황토와 모래를 1 : 1로 혼합한 의사시료(F-8)는 2.5%의 값을 나타냈으며, 이는 동일한 토양 혼합비에 유기 매체를 혼합한 의사시료(F-10,-11,-12)의 변화 값인 2%~2.8%와 유

Figure 1. The graph classification of materials for test.

Figure 2. Produced specimen by each test. (A) Test for strength and water resistance, (B) Test for change in length, (C) Test for Ultrasonic measurement.

사하였다. 모래의 혼합비가 높은 의사시료들은 낮은 길이 변화 값을 보였다. 황토와 모래를 1 : 2로 혼합한 의사시료(F-7)가 0.8%로 가장 낮은 값을 보였으며 점토와 모래를 1 : 2로 혼합한 의사시료(F-4)는 1.4%를 나타내었다. 모래로 된 의사시료(F-3)에서는 길이 변화가 나타나지 않았다. 각 토양 종류별 혼합군에 대한 평균 길이 변화 값을 살펴보면, 점토 혼합군이 3.4%, 황토 혼합군이 1.6% 그리고 유기 매제 혼합군이 2.4%로 점토 혼합군에서 가장 높은 평균 변화 값을 나타내었다. 이는 입도 분포가 미세한 입자일수록 부피의 축소로 인한 길이의 변화가 높게 발생하는 것을 알 수 있다.

2.2.3. 유기 매제 혼합군 미세조직 관찰 결과

의사시료에 혼합된 유기 매제가 토양과 결합된 현상을 미시적으로 관찰하였다. 유기 매제를 혼합하지 않은 의사시료(F-8)는 점토 입자의 크기로 추정되는 물질이 응집된 형상을 나타내었으며, 이외의 물질은 관찰되지 않았다. 도박풀을 혼합한 의사시료(F-10)는 토양 입자들과 함께 도박풀에서 기인한 것으로 보이는 반투명의 피막을 관찰할 수 있었다. 반투명의 피막은 입자의 표면에 피복되어 있거나 공극 부분에서 겔을 형성한 모습을 관찰할 수 있었다. 전분

풀을 혼합한 의사시료(F-11)에서는 두꺼운 피막이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이는 도박풀로 인한 피막과는 차이를 보이며, 피막 위로 미분들의 교집상이 관찰되었다. 아크릴 퍼티를 혼합한 의사시료(F-12)는 전분풀을 혼합한 의사시료(F-11) 양상과 유사하게 두꺼운 피막이 관찰되었고 토양 입자들이 응집된 형상을 나타냈다(Figure 5).

2.2.4. 초음파 전달속도 측정 결과

의사시료에 대한 초음파 전달 속도를 측정 결과, 전반적으로 황토 혼합군의 초음파 속도가 높게 측정되었다. 황토와 모래가 동 비율로 혼합된 의사시료(F-8)는 682m/s로 가장 높은 값을 나타냈고, 황토와 모래가 2 : 1로 혼합된 의사시료(F-9)는 667m/s로 두 번째로 높게 측정되었다. 황토와 유기 매제의 혼합군에서는 도박풀을 혼합한 의사시료(F-10)가 572m/s, 전분풀을 혼합한 의사시료(F-11)는 506m/s, 퍼티를 혼합한 의사시료(F-12)는 493m/s로 측정되었으며 이는 유기 매제를 혼합하지 않은 황토군과 비교하였을 때, 약 100~180m/s 가량 낮은 값이었다. 유기 매제로 인하여 초음파 속도의 저감이 나타남을 알 수 있다. 점토 혼합군 의사시료(F-4~F-6)는 모두 혼합비에 따른 큰 변화를 보

Figure 3. Changes of specimen of made in the wall.

Figure 4. After drying of specimen for measure of length change.

Figure 5. Microstructure of Specimen Medium Group(×1,000). (A) F-8, (B) F-10, (C) F-11, (D) F-12.

이지 않았다. 점토만으로 제작된 의사시료(F-1)의 속도에 비해 점토에 모래가 2배 혼합된 의사시료(F-6)의 속도 값은 495㎍로써 약 135㎍의 차이를 보인다. 이는 점토를 구성하는 입자가 공극을 메우면서 입자간 접촉 면적이 넓어지고 그 영향으로 인해 초음파 속도가 증가한 경향을 반영한다(Figure 6).

2.2.5. 압축강도 측정 결과

압축강도 측정 결과, 점토와 모래가 2 : 1로 혼합된 의사시료(F-6)와 점토로 제작한 의사시료(F-1)가 각각 7.57MPa, 7.69MPa로 가장 높았으며, 황토로 제작한 의사시료(F-2)는 3.60MPa로 점토에 비해 강도가 절반 이하로 낮게 나타났다. 또한 점토와 모래를 혼합한 의사시료(F-4,-5)가 황토와 모래를 혼합한 의사시료(F-7,-8)보다 압축 강도가 높게

측정되었다. 즉, 황토 보다는 점토가 높은 강도를 발현하고 모래가 혼합되면 상대적으로 강도가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 황토와 모래가 1 : 1인 의사시료(F-8)는 1.06MPa의 현저하게 낮은 강도 값을 보인 반면 같은 비율에 유기매제를 혼합한 의사시료(F-10~F12)는 상대적으로 높은 강도 값을 나타냈다. 그 중 도박이 혼합된 의사시료(F-10)가 4.47MPa로 가장 높은 값을 기록하였다(Figure 6).

2.2.6. 침수시험 결과

의사시료의 침수 후 점토 의사시료(F-1)와 황토 의사시료(F-2)는 빠른 흡수와 함께 분해가 진행되었다. 30 분경과 후 점토 의사시료는 수위가 40mL 줄고 황토 의사시료는 70mL가 감소하였다. 1시간 경과 후 점토 의사시료는 큰 균열이 발생되면서 완전히 붕괴되었고, 최종 수위는

Table 4. Change in distilled water and specimen's condition during immersion test.

Volume Time	F-1	F-2	F-8	F-10	F-11	F-12
00:00	250	250	250	250	250	250
00:10	240	230	230	250	240	240
00:20	220	210	210	250	220	210
00:30	210	180	190	250	210	200
00:60	210	150	170	250	180	180
03:00	-	120	170	240	160	170
06:00	-	-	160	230	120	120
12:00	-	-	160	230	120	120
24:00	-	-	-	-	-	-
2days	-	-	-	-	-	-
Absorption	40	130	90	20	130	130
Results	After collapse, granular decomposition	After collapse, granular decomposition	Rapid absorption, granular decomposition of wetted parts	No change	No change	decomposition of lower parts, maintain condition

Figure 6. Results in measure of Specimen. (A) Length change, (B) Ultrasonic transmission speed, (C) Strength.

Table 5. List of test samples.

Sample	Weight of Soil(Ratio)	Weight of seaweed and distilled water
A-1	200g (Clay : sand=5:5)	seaweed 8g, distilled water 32g
A-2		seaweed 20g, distilled water 20g
A-3		seaweed 32g, distilled water 8g
B-1	200g (Clay : sand=3:7)	seaweed 8g, distilled water 32g
B-2		seaweed 20g, distilled water 20g
B-3		seaweed 32g, distilled water 8g

210mL이다. 황토 의사시료는 1시간 경과 후부터 붕괴가 진행되어 3시간까지 진행이 나타났으며 더 이상 변화가 나타나지 않았을 때의 수위는 120mL였다. 황토와 모래가 1 : 1로 혼합된 의사시료(F-8)는 침수 후 10분이 경과되면서 하단부터 분해가 발생하였다. 30분 경과 후에 수위가 60mL 감소되었고 다른 의사시료들에 비해 가장 단시간에 의사시료 상당부까지 수분의 흡수가 이루어졌다. 1시간 경과 후부터 분해 속도가 감소하였으며, 3시간 경과 후부터 변화가 없었고 최종 수위는 90mL였다. 도박풀 혼합 의사시료(F-10)는 30분 경과까지 수위 변화가 없었고, 전분풀 혼합 의사시료(F-11)와 아크릴 퍼티 혼합 의사시료(F-12)는 수위가 각각 40mL, 50mL씩 감소되었다. 1시간 경과 후, 아크릴 퍼티 혼합 의사시료는 하단부에서 분해가 발생되었고 의사시료 최상단까지 수분이 흡수되면서 70mL의 수위가 감소되었다. 도박풀 혼합 의사시료(F-10)은 1시간 경과까지 수위 변화를 보이지 않았으며, 전분풀 혼합 의사시료(F-11)는 70mL의 수위가 감소되었다. 의사시료들의 내수성으로 인한 변화는 1시간 내에서 빠르게 발생하였고, 3시간 경과 후부터는 큰 변화가 관찰되지 않았다. 12시간 경과 후 점토 및 황토 의사시료는 완전 붕괴되었고, 황토와 모래 1 : 1 비율의 의사시료는 하단부 분해가 상당 부분 진행되었으나 대부분의 형태를 유지하며 붕괴되지 않았다. 유기 매제 혼합 의사시료는 도박풀 혼합 의사시료가 20mL 전분 혼합 의사시료가 120mL, 아크릴 퍼티 혼합 의사시료가 120mL의 수위 변화를 보였으며 형태의 변화는 없었다. 48시간 경과 후, 더 이상의 변화는 발생되지 않았고 도박풀 혼합 의사시료(F-11)는 의사시료 상당까지 수분 흡수가 이루어지지 않았으며 분해도 전혀 진행되지 않았다.

2.3. 2차 실험

2.3.1. 보존처리 대상 물성 조사

실제 적용용 충전제를 제작 및 테스트하기 위해 보존처

리 대상인 구)명부전 벽화의 토양 구성 물질을 확인하였다. XRD 분석 결과 공통적으로 석영, 일라이트, 장석류의 광물들이 동정되었고, 일부 녹니석과 각섬석이 동정되었다. 토양의 입도는 중벽 층은 점토질(clay and silt)과 모래(sand)의 비율이 약 67 : 33과 51 : 49로 나타났으며 마감 층의 입도 분석 결과는 두 벽체 모두 점토질(clay and silt)과 모래(sand)의 비율이 33 : 67로 나타났다. 이러한 분석 결과는 우리나라 전역에 분포하는 황토의 주요 구성 성분으로써, 흙으로 조성된 조선시대 사찰 벽화의 전통적인 제작 양식에서도 찾아볼 수 있다. 따라서 보강 작업에 적용될 충전제는 분석 결과를 토대로 점토와 모래 두 종류를 사용하여 벽체의 층위와 기능에 따라 토양의 조성비를 달리하여 충전제를 제작하였다.

2.3.2. 충전제 제작

보존 처리에 적용되는 점토와 모래의 종류와 입도는 토양은 1차 실험에서 쓰인 재료와 동일하게 사용하였고, 유기 매제는 1차 실험에서 우수한 결과를 보인 도박풀을 사용하였다. 토양의 혼합비는 보존 처리 대상인 구)명부전 벽화의 중벽 층과 마감 층의 입도비를 참고로 하여 점토와 모래의 비율을 각각 5 : 5, 3 : 7로 설정하였다. 도박풀의 농도비는 도박과 물의 비율을 3종류로 나누어 총 6종의 충전제를 제작하고 그에 따른 물리적 특성을 비교하였다. 도박풀은 증류수 7.2L에 건조 도박 20g을 넣고 90분간 가열한 결과(National Science Museum, 1996), 약 2~2.5L의 도박풀 물이 추출되었으며 거름지에 1차 걸러 도박 찌꺼기를 정제한 뒤 사용하였다.

2.3.3. 물리적 특성 조사

실제 적용 충전제의 물리적 특성 조사는 1차 실험 결과를 토대로 하여, 보존 처리 전 현장에서 테스트가 가능한 실험인 길이 변화 및 중량 변화 값을 측정하였다. 실험 방법은 6 종의 충전제를 Petri Dish(90 × 20mm)에 담아 양생

Table 6. Value of the sample size change.

Sample	size of after drying(mm)			average of change size (mm)	The rate of change (%)	weight of before drying (g)	weight of after drying (g)
	1	2	3				
A-1	84.35	83.46	84.74	-2.19	△2.5	166.7	132.8
A-2	83.47	83.91	83.72	-2.67	△3.1	163.3	128.5
A-3	84.00	84.46	84.23	-2.14	△2.5	168.8	134.5
B-1	86.37	86.37	86.37	-	-	177.3	144.1
B-2	86.37	86.37	86.37	-	-	169.4	137.6
B-3	86.37	86.37	86.37	-	-	168.4	136.8

후 각각의 변화 양상을 조사하였다. 수축된 길이 변화는 디지털캘리퍼스(Mahr 16EX, Germany)를 사용하여 서로 다른 각도에서 3차례 측정된 뒤 평균값을 내었으며, 시편의 중량은 전자저울(AND CB1200, Korea)을 사용하여 제작 당시와 건조가 완료된 후를 각각 측정하였다.

2.4. 2차 실험 결과

2.4.1. 길이 변화 측정 결과

시료의 길이 변화율은 A 그룹은 평균 2.7%가 감소되었고, B 그룹은 육안 상으로는 수축이 발생되지 않아 길이 변화 값의 측정이 불가능했다. 1차 실험에서의 길이 변화 결과에 비추어 볼 때 충전제의 길이 변화는 토양의 조성비가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 2차 실험에서는 도박풀의 첨가가 충전제의 수축률을 저감시키는데 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

A 그룹의 길이 변화 값은 1차 실험에서의 점토 혼합군 F-5의사시료의 평균 길이 변화 값 4.2%보다 적은 값이고, 이는 혼합된 도박풀의 영향에서 기인하는 것으로 보인다. 또한 A 그룹의 평균 길이 변화 값은 점토를 사용하였음에도 1차 실험 결과인 황토 혼합군 의사시료 F-10의 평균 길이 변화 값인 2.8%와 유사한 수치를 보여, 이 또한 황토에 비해 분급도가 낮은 점토에서 발생할 수 있는 수축률을 도박풀이 감소시킨 것으로 판단된다. B 그룹의 길이변화는 전혀 발생되지 않았으며, 1차 실험의 점토 혼합군 F-4의사시료의 평균 길이 변화 값 1.4%보다 낮게 조사되었다. 이 경우 역시 도박풀이 혼합되어 수축률을 감소시킨 결과로 해석할 수 있다.

2.4.2. 보존 처리 적용

보존 처리 대상인 구)명부전 벽화는 중벽 층과 마감 층

에 대한 충전이 요구되며, 토양 간 결합력이 상실된 상태였다. 1차 실험 결과와 보존처리 대상의 입도 분석 결과를 종합하여 중벽 층에 사용될 충전제의 조건은 A 그룹을, 마감 층에 사용될 충전제는 B 그룹의 조건으로 제작하였다. 2차 실험 결과 각 그룹 내 세 가지 타입의 도박풀의 혼합량에서는 물리적인 변화의 차이가 크게 발생하지 않았기 때문에 보존 처리 대상의 손상 정도에 따라 세 가지 도박풀 혼합량에 따른 충전제를 제작하여 각각 사용하였다.

중벽 층 사용 충전제는 수축 변화가 다소 발생되었지만 점토의 함량이 높아 강도가 높으므로 도박풀의 혼합량이 적은 A-1 조건의 충전제가 많이 사용되었다. 중벽층에 충전제 적용 결과, 원 벽체와 충전제 간 결합 상태가 좋고 강도 발현도 우수하게 나타났다.

마감 층에 사용되는 충전제는 모래 함량이 높아 수축률은 낮지만 1차 실험 결과에 따라 강도 발현이 낮은 점을 감안하여 도박 함량이 다소 높은 B-2 조건의 충전제를 주로 사용하였다. 모래 함량비가 높은 충전제에 혼합된 도박풀은 물리적인 안정성을 보완할 수 있었고, 마감층 처리 결과 충전 부위가 수축으로 인한 균열이 없고 표면 질감 역시 주변 원 마감층과 이질감 없이 안정적으로 처리되었다.

3. 고 찰

3.1. 실험 결과 고찰

실험 결과를 통해 충전제의 물리적 변화를 고찰하면, 점토 또는 황토만으로 제작한 의사시료에서 균열이 크게 발생하고 높은 수축률을 보였으며, 모래를 혼합한 경우에도 황토 혼합군에 비해 점토 혼합군에서 물리적 변화가 크게 나타났다. 비교적 황토 혼합군은 점토 혼합군에 비해 균열 빈도가 낮게 나타났는데, 이는 황토 자체에 포함된 중립사

및 조립사의 영향으로써 입도가 큰 토양 입자들이 미분부의 축소를 방지한 것으로 보인다. 모래는 혼합비율이 높아질수록 현저히 낮은 수축률과 균열의 발생이 감소되는 경향을 보였는데, 이는 모래의 혼합비가 높아지면 보강제가 건조되는 과정에 발생하는 부피 축소로 인한 물리적 변화가 저감되는 것이다. 즉, 입자 크기가 큰 중립사 이상의 토양이 실트질 이하에 일정 비율 혼합되어야만 수축 및 균열의 발생을 감소시킬 수 있을 것으로 보인다.

유기 매제의 혼합 여부 역시 보강제의 수축과 균열에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 유기 매제가 혼합될 경우 부피 축소가 일부 발생되었는데, 이는 유기 매제의 건조로 인한 부피축소가 증가되는 것으로 해석된다. 그러나 유기 매제가 혼합된 보강제를 벽체 표면에 적용할 경우 균열이 저감되었는데 이러한 결과는 유기 매제와 벽체 간의 반응을 고려하여 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

의사시료에 사용된 혼합 재료는 모래를 포함하여 세립사와 점토질 등이 일정 비율로 혼합되었다. 이 시험에서 사용된 점토는 조립사 및 중립사 등 구성 입자들 사이의 공극을 충전하여 점착 효과를 증가시킨다. 의사시료는 수비 과정에서 함수율이 높은 점토로 인해 전기적 인력이 작용하여 응집력이 발생하고 이후 건조 과정에서 부피가 축소되면서 입자 간의 접촉면이 늘어나게 되고 그로 인해 강도 등의 내구성이 증가한 것으로 해석할 수 있다.

초음파 속도 측정 결과 점토나 황토의 비율이 높은 의사시료가 높은 속도 값을 나타내고 모래를 많이 혼합한 의사시료일수록 속도 값이 낮아지는 경향을 보였다. 이는 균질하고 공극률이 낮은 토양이 높은 물성을 발현하며, 모래의 혼합은 물성을 저하시키는 효과를 보이는 것으로 사료된다. 또한 토양 혼합비는 충전제의 물성과 밀접한 관계가 있으나, 유기 매제 혼합 여부는 물성의 증가에 크게 기여하지 않는 결과를 보였다. 이는 의사시료를 구성하는 토양의 입도비, 공극률 등이 반영된 결과이므로 유기 매제 혼합비가 의사시료의 속도 증가에 영향을 미치지 못하는 정도임을 알 수 있다.

압축 강도 실험 결과 역시 점토가 가장 높은 강도를 나타냈으며, 황토는 점토의 절반 정도의 강도 값을 보였다. 모래는 대부분 강도가 낮은 경향을 보였으며 특히 중립사 이상의 입자 혼합비가 높은 의사시료의 강도 값이 낮게 나타났다. 유기 매제를 혼합한 의사시료군은 상대적으로 강도 값이 증가했는데, 이는 유기 매제가 토양 표면에 피막을 형성하면서 입자 간의 결속을 증대시키고 공극을 충전한

결과 의사시료의 강도 발현에 기여한 것으로 판단된다. 따라서 보강제의 강도는 점토질 입자의 혼합비가 높을 때 내구성이 상승되며 유기 매제의 혼합 역시 벽체 내구성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

침수 시험에서는 점토 및 황토로만 제작된 의사시료의 수분 흡수율과 팽윤성(swelling effect) 등을 확인할 수 있었으며 충전제에 함수율이 높은 점토의 혼합비가 증가할 경우 붕괴의 위험이 높음을 예측할 수 있었다. 반면 황토와 모래를 혼합한 의사시료는 내수성이 높게 나타났는데, 이는 중립사 이상의 입자가 물리적인 성능을 발휘하여 시험 시간 내에서는 붕괴까지 이어지지 않은 것으로 판단된다. 유기 매제의 혼합에 따른 내수성 평가에서는 도박풀을 혼합한 의사시료가 우수한 효과를 나타냈다. 유기 매제에서 형성된 겔은 입자와 입자를 연결하는 교차 형상과 입자 사이의 공극을 메우는 형상이었는데, 토양에 혼합된 도박풀은 수분에 대한 반발도가 높은 물질로 이해되며 이에 대한 물성 특성은 추가적인 연구가 요구된다.

3.2. 적응성 고찰

점토의 혼합비가 높은 보강제는 물성은 높아질 수 있으나 건조 과정에서 수축률로 인한 물리적 변화 즉, 균열이 발생 물리적 변화가 크게 작용하게 된다. 또한 수분에 취약한 단점이 있다. 이러한 현상을 감안하여 모래의 혼합비가 높아지게 되면 오히려 물성이 떨어지게 되며, 점착성이 떨어져 적용된 부위에 보강 효과가 저해될 수 있다. 이는 보존 처리를 수행하는데 있어서도 불편함이 발생될 수 있으며 보강이 완료된 후에도 표면 거칠기로 인해 완성도가 떨어지는 등 재처리가 요구되는 제반 문제점들이 나타날 수 있다. 황토의 경우 역시 입도가 높은 토양이 혼합된 상태에서 모래 혼합비가 높으면 응집력이 떨어져 내구성이 저하될 수 있다.

모래의 경우는 혼합비에 따라 보강제의 물리적 변화와 내구성에 서로 다른 결과를 반영하게 된다. 모래의 혼합비가 높으면 수축률이 저감되어 균열 발생은 줄일 수 있지만 초음파 속도와 강도 측정 결과에서 확인된바와 같이 모래의 혼합비가 높을수록 보강제의 물성은 저하된다.

따라서 미립자의 토양을 사용하여 충전제를 제작할 경우 입자가 큰 중립사 이상의 모래를 일정 비율 혼합하면 최밀 충전 효과로 인해 수축과 균열 등에 대한 물리적 안정성을 높일 수 있는 것을 시험을 통해서도 확인하였다. 즉, 점

Table 7. The results of specimen for suitable filling material.

Sample	Condition of mixture	Durability	Water resistance	Shrinkage
F-1	clay only(non medium and additive)	Excellence	not good	not good
F-2	loess only(non medium and additive)	Fine	not good	not good
F-3	sand only(non medium and additive)	-	-	Excellence
F-4	clay : sand = 1 : 2(non medium and additive)	-	-	Excellence
F-5	clay : sand = 1 : 1(non medium and additive)	-	-	not good
F-6	clay : sand = 2 : 1(non medium and additive)	Fine	-	not good
F-7	loess : sand = 1 : 2(non medium and additive)	-	-	Excellence
F-8	loess : sand = 1 : 1(non medium and additive)	Fine	normal	Excellence
F-9	loess : sand = 2 : 1(non medium and additive)	Fine	-	normal
F-10	loess : sand = 1 : 1(seaweed in water 5% with hemp)	Excellence	Excellence	normal
F-11	loess : sand = 1 : 1(starch in water 5% with hemp)	Fine	Fine	normal
F-12	loess : sand = 1 : 1(acrylic putty in water 5% with hemp)	Fine	Fine	Fine

토와 모래의 혼합이 적정량으로 이루어지면, 점토는 건조 과정에서 발생하는 수축을 통해 모래와 같은 중립질 입자 사이를 충전하고 혼합된 토양 입자 간격을 유지하면서 부피 축소로 인한 물리적 변화를 감소시키는 것으로 해석된다. 대체적으로 충전제로 적용되기에 안정적인 혼합비를 살펴보면, 점토는 모래가 약 50% 이상이 혼합되어야 균열을 저감시킬 수 있으며, 현장 주변의 황토를 사용할 경우 조립사 이상의 입자는 분리될 수 있도록 수비 과정을 거친 후 약 50% 이상이 모래와 혼합되어야 내구성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

충전제는 혼합비에 따른 적용 이외에도 고려되어야 할 사항이 있는데, 손상된 벽화가 외부환경 또는 고습한 환경에 위치한 경우이다. 벽화에 적용된 보강제가 장시간 외부에 노출되면 온습도 변화와 자외선에 의해 물리적 및 광화학적 손상을 일으킬 수 있다. 이때 온습도의 주기적 변화가 크게 반복되면 벽화와 보강제 간 열팽창 계수 및 탄성 계수가 각기 다른 잔여 응력으로 반응하여 벽화와의 분리 또는 보강제 자체적인 손상 등이 발생된다.

이와 같이 환경 변화에 따른 보강제 적용은 우선적으로 환경에 반응할 수 있는 요인들 즉, 매제와 같이 내후성으로 인해 변화를 초래할 수 있는 재료들을 최소화해야 한다. 그러나 벽화가 고습한 환경 또는 풍우에 노출될 경우 토양 혼합비만으로는 보존성이 떨어지기 때문에 일정량의 매제 혼합이 불가피하다. 습도가 높은 환경에서 점토는 취약하기 때문에 모래의 혼합이 다소 높아야 하는데, 물성이 저하될 수 있으므로 일정량의 유기 매제를 혼합하여 보강제의 물리적 성능을 보완할 필요가 있다. 이러한 조건에 따른 유

기 매제는 우선 대기적 요인에 안전해야 하며 수분에 대한 저항력이 강해야 하는데, 이때는 토양 혼합 시 내수성과 내구성이 우수하게 나타난 도박풀의 적용이 효과적일 것으로 판단된다.

보강제의 혼합비에서 고려되어야 하는 또 다른 한 가지는 충전제가 물리적 압력에 버틸 수 있어야 하는 경우인데, 벽체의 층간 분리가 심하거나 또는 벽화가 해체된 후 원위치 될 때이다. 이때는 충전제가 건물의 일부 구조체로서 높은 내구성을 지녀야하므로 물리적인 성능을 높이기 위해 매제의 혼합이 필요하다. 시험 결과로 볼 때 모래에 대한 점토의 혼합비가 두 배일 때 가장 높은 강도를 발현하지만 내수성은 저하되므로, 여기에는 환경에 대한 검토가 이루어진 후 선별적인 매제사용이 이루어져야 한다.

실험에서 얻어진 조건들은 이번 연구된 보강제 자체의 실험 결과를 반영한 것으로서, 모든 벽화들의 손상 부위에 대하여 일괄적으로 적용되기는 한계가 있으며, 여러 조건에 따른 혼합비의 적정량을 제시하기에도 다소 무리가 있다.

시험 결과에서도 확인할 수 있듯이 흙으로 조성된 벽체를 보강하는 목적으로 사용되는 재료가 반드시 강할 필요는 없다. 또한 목적성이나 기준이 마련되지 않은 채 사용되는 매제 역시 의미가 없으며 오히려 손상을 가속화시킬 수 있다는 것을 명기해야 한다.

현재 시점에서 제시된 내용을 기반으로 안정적이고 최적의 효과를 얻기 위해서는 연구 결과를 참고로 하여 현장에 마련된 재료를 대상으로 혼합비에 따른 기초 물성 시험을 실시하는 것이 바람직할 것이다. 또한 벽화의 상태와 적용 범위를 검토 후 전문가의 경험에 따라 합리적으로 적용

할 수 있는 현장에서의 판단력도 요구된다.

4. 결 론

벽체의 파손이나 유실 부위에 대한 보강 작업에 사용되는 충전제는 사용되기에 앞서 재료에 대한 안정성을 파악하고 그에 따른 적합성이 우선적으로 검토되어야 한다. 물리적인 안정성으로서는 보강제가 지닌 기본적인 점력과 건조 후에 발생하는 형태적인 변화 그리고 보강제 자체의 내구성 등이 있고 화학적인 안정성으로는 외기 환경에 따른 물성 변화와 보강제의 재질이 벽화로 전이될 수 있는 요소들을 예로 들 수 있다.

상기 조건들이 모두 고려된 보강제가 이상적일 수 있겠으나, 현재로서는 그 단계까지의 면밀한 접근은 시도되지 못한 상태이다. 이에 본 연구에서는 충전제를 적용함에 있어 보존 처리 현장에서 파악이 가능한 부분을 염두하고 시험을 실시하였으며, 결과를 통해 확인된 충전제 특성을 토대로 실제 보존 처리 대상에 적합한 충전제를 테스트 후 보강 작업에 적용하였다. 연구 결과는 사찰 벽화 보존 처리 현장에서 보다 효과적이고 안정적인 충전제를 제작하는데 참고할 수 있는 주요 자료로 활용되기를 기대한다. 토양으로 구성된 사찰 벽화 균열부 보강에 사용되는 충전제에 대한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 충전제에서 나타나는 균열과 수축률 조사 결과 황토 또는 점토만을 사용한 의사시료에서 가장 많은 균열들이 발생하였다. 그 다음으로는 점토 혼합군에서 비교적 균열 정도가 높게 나타났고, 황토 혼합군에서 모래 혼합비가 적은 의사시료에서 미세 균열이 일부 발생하였다. 길이 변화는 모래가 혼합되지 않은 점토와 황토 의사시료가 가장 높게 나타났고, 주로 황토 혼합군의 길이 변화가 낮았다.

2) 초음파 속도 측정 결과, 황토와 모래를 같은 비율로 혼합한 의사시료에서 가장 높은 속도 값이 측정되었다. 점토만으로 제작된 의사시료도 높은 속도 값을 보였으며, 대체적으로 모래의 혼합비가 높은 의사시료들 순으로 속도 값이 낮아지는 경향을 나타냈다.

3) 의사시료의 강도는 점토만을 사용한 의사시료와 모래가 적게 혼합된 점토 혼합군에서 가장 높은 강도 값을 보였다. 또한 모래가 혼합된 점토 혼합군과 황토 혼합군에서 강도 값이 낮게 측정되었으며, 유기 매제 혼합군에서 상대적으로 높은 강도 값을 나타내었다.

4) 내수성 시험에서는 비 혼합군 의사시료에서 빠른 분

해가 일어났고, 황토와 모래가 혼합된 의사시료는 수분 흡수와 함께 일부 분해가 나타났다. 유기 매제 혼합군은 수분 흡수가 발생되었으나 형태적인 안정성을 보였고, 도박풀이 혼합된 의사시료는 형태의 변화 없이 수분흡수율도 낮았다.

5) 토양을 사용한 충전제의 건조로 인한 수축과 균열 등의 물리적 변화는 부피 축소이며, 모래와 같은 중립질은 입자의 간격을 유지시키고 점토질은 건조 과정의 수축을 통해 중립질 입자의 사이를 충전하기 때문에 이 두 재질 간의 적절한 혼합비는 충전제의 물성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

6) 실제 보존 처리에 적용할 충전제를 보존 처리 대상의 입도비 조건에 맞게 제작하고 물리적 특징을 살펴본 결과, 토양 혼합비에 따른 결과는 1차 실험과 같은 경향을 보였으며, 토양에 도박풀이 혼합될 경우 충전제의 수축률을 보다 더 저감시키는 효과를 나타내었다.

7) 실제 적용은 중벽의 경우 응집력과 강도가 높은 특징을 지닌 점토의 비율을 높여 제작한 충전제를 적용하였고, 마감 층의 균열 부위는 모래의 함량을 다소 높게 제작하였지만 도박풀로 물리적인 안정성을 보완하였다. 마감 층의 입도와 유사한 조건의 충전제 적용은 원 벽체와 보강 재료 간의 자유함수율의 편차 발생을 감소시켜 보존성을 증가시킬 것으로 예상된다.

REFERENCES

- Baekje Cultural Heritage Conservation Institute, 2010, A Report on conservation of the Mural Painting in Pokwangmyonjeon Hall of Wibongsa Buddhist Temple. 101-104. (in Korean)
- Han, K.S., 2003, Restoration and Conservation of the Buddhist Mural Paintings of Korea, Ph.D. Dissertation, University of Herzen State Pedagogical, 121.
- Han, K.S. and Jo, J.Y., 2009, Study on the filler for the treatment of mural paintings. Science and Engineering of Cultural Heritage, 8, 17-27. (in Korean with English abstract)
- Hanrim Conservation and Technology, 2008, A Report on Conservation of the Mural of Suwalgwaneum in Daeung-jeon Hall of Heungguk-sa Temple and the Mural on the External Wall of Musa-jeon Hall. 102-104. (in

- Korean)
- Kim, S.K. and Jeong H.Y., 2008, Study on the filling material for the painting wall layer of the temple wall painting using a natural adhesive. Conservation Science Research, 29, 256-279. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S., 2013, An analytical study of material characteristics for the Conservation of Korean Buddhist mural paintings. Doctor's Thesis in Dongguk University, 18-33. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.M., Lee H.S. and Kim M.J., 2012, Analysis and Investigation of Materials and Condition for Buddhist Wall Painting -Focusing on Wall paintings of Judgement Hall in Jikji Temple. Journal of Buddhist Art, 14, 187-188. (in Korean with English abstract)
- National Science Museum, 1996, Traditional Science and Technology Research (IV). 126. (in Korean)
-