

전통 벽화의 토벽체 비파괴진단 조사연구 - 강진 무위사 벽화보존각내 벽화를 중심으로 -

채상정 | 양희제* | 한경순**

국립공주대학교 문화재보존학과
*국립문화재연구소 미륵사지석탑보수정비사업단
**건국대학교 회화보존전공

Nondestructive investigation of clay wall structure containing traditional mural paintings. - The clay walls having mural paintings housed in the protective building in Muwisa Temple, Kangjin, Jeollanamde Province -

Chae Sang-jeong | *Yang Hee-jae | **Han Kyeong-soon

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University Kongju 314-701, Korea
*Iksan Mireuksaji Stone Pagoda Conservation Team, National Research Institute of Cultural Properties, Iksan 570-911, Korea
**Department of Conservation of Painting, Konkuk University, Chungju 322, Korea

초록 강진 무위사의 벽화보존각내에 보존된 벽화를 비파괴진단하기 위해 초음파탐사와 열적외선 조사를 실시하였다. 벽체의 진흙은 gravel 1.78 g, sand 5.39 g, silt 4.91 g, clay 6.26 g 이다. 조사된 8개 벽화의 초음파 속도 평균은 보살도(No.6)<관음보살도(No.5)<보살도(No.14)<주악비천도(No.20)<주악비천도(No.17)<오불도(No.3)<삼존도(No.1)<아미타내영도(No.2)로 순서이고 범위는 71.63~3610.11 %, 평균 417.44 %이며 일축압축강도 70.34~533.28 kg/cm², 평균 84.23 kg/cm²이다. 신선한 진흙벽체의 초음파 속도는 약 850 %를 내외하고 800 %이하의 속도가 나타나는 곳은 최초 발생한 미세균열이 확장되어 물성이 저하된 것으로 예상된다. 600 %내외에서는 한 화면에서 물성저하 또는 물성편차가 현저해 질 수 있다. 400 % 내외의 속도는 진흙벽체가 서서히 압축되어 견고하게 느껴지나 물성은 취약하며 진흙벽체에 입상분해가 발생하기 쉬운 상태는 200 %이하의 속도를 나타내었다.

중심어 : 벽화, 비파괴 조사, 초음파, 열적외선, 물성

ABSTRACT This study, in order to do a nondestructive research on the mural walls kept in the protective house in Muwisa Temple, Kangjin, took four examinations; particle size analysis, XRD analysis, ultrasonic investigation, and thermo-infrared investigation. Component ratio of mural wall varied; clay of wall bodies consisted of gravel of 1.78 g, sand of 5.39 g, silt of 4.91 g and clay of 6.26 g. Ultrasonic velocity and one-axis compression strength tests done with eight mural-painted walls yield results as follows; the value of ultrasonic velocity ranged between 71.63 and 3610.11 m/s with the average of 417.44 m/s and on-axis compression strength ranged between 70.34 and 533.28 kg/cm² with the average of 83.23 kg/cm². The value increased in the order of Bosaldo(No.6)<Gwaneumbosaldo(No.5)<Bosaldo(no.14)<Juakbicheondo(No.20)<Jualbicheondo(No.17)<Obuldo(No.3)<Samjondo(No.1)<Amitanaeyeongdo(No.2). While the ultra-sonic velocity of clay wall samples made with fresh clay was 850 m/s or so, the physical property of some spots of the samples showed value below 800 m/s were thought to had been deteriorated due to micro-sized crack expanded. The ultrasonic velocity value of around 400 m/s was checked from weak parts of the samples whose clay wall body had been compressed slowly while below 200 m/s was checked from clay wall body being in unstable condition where components were easy to be decomposed into granule.

Key word : mural, nondestructive investigation, ultrasonic, thermo-infrared ray, physical properties

1. 서론

강진 무위사의 극락보전에는 아미타후불벽화(보물 1313호), 백의관음도(보물 1314호)등의 주요벽화가 있고 벽화보존각내에는 1984년에 극락보전에서 이전된 삼존도, 아미타내영도, 오불도, 보살도, 관음보살도 등 총 30여점의 벽화가 있다. 벽화가 건물에서 분리된 사례는 부석사 조사당 벽화가 대표적이며 비교적 이른 시기에 봉정사 극락전 벽화도 건물에서 분리된 후 보호각에 보관되어 있다. 무위사 벽화보존각의 벽화나 부석사 조사당 벽화와 같이 벽화가 건물에서 분리된 후 별도의 문화재로 전시되는 점은 벽화가 단일 문화재로서 손색이 없음을 의미한다.

전통목조건축물의 벽체를 장식하는 벽화는 자연상태에서 건조된 진흙벽체에 기초한다. 이 진흙벽체는 건축물로 인해 지속적으로 물리적인 외력을 받고 오랫동안 자연환경의 영향을 받으면서 구조적인 훼손과 더불어 물성이 취약한 상태이다. 그러나 벽화의 보존관리는 소홀하고 보존과학적 연구도 미흡한 실정이며¹, 다만 현대적인 보존처리 수법만이 90년대 중반이후 도입되어 최근까지 수행되고 있다.² 시급히 벽화보존을 위한 합리적인 관리방안이 수립되고 기초과학적 연구도 다양하게 수행되어야 한다.

목조건축물을 장식한 벽화의 벽체에 대한 적합한 안전진단방법은 현재 제시되지 않은 상태이나, 이 연구에서는 벽체의 안전진단 방법을 규명하고자 벽화보존각에

보존된 벽화를 대상으로 벽체에 사용한 진흙의 입도를 분석한 후 이에 기초하여 시험벽체와 공시체를 제작하였고 초음파 측정으로 물성을 진단하였다. 또한 초음파 측정 자료를 이용한 물성분포도와 훼손도 및 열적외선을 이용해 초음파 탐상을 검토하고 벽화의 부분적인 상태 자료를 확보하였다. 따라서 이번 조사는 벽화가 그려진 진흙벽체를 대상으로 비파괴 조사법을 이용한 안전진단 연구인 한편, 벽화 보존처리 과정에 필요한 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 벽화현황과 연구방법

2.1. 벽화의 현황

무위사의 벽화보존각에 보존된 벽화는 삼존도와 아미타내영도의 경우 350 × 200cm이고 목조건축물의 포벽 부분에 해당하는 벽화는 약 35 × 60cm 또는 150 × 40cm정도이며 외곽의 형태가 다소 복잡한 보살도는 약 70 × 90cm이다. 삼존불화, 아미타내영도, 관음보살도는 황색바탕 위에 묵선으로 그림의 윤곽을 확인할 수 있고 녹색과 입술의 색상이 약간 남아 있다. 이를 제외한 벽화는 기존의 그림 위에 녹색바탕의 벽화가 층위를 형성하며 덧그려졌다. 벽화의 훼손양상은 균열, 박리박락, 굽힘, 들뜸 현상 등이며 벽화 정면이 평탄치 않아 높이에서 차이가 난다.

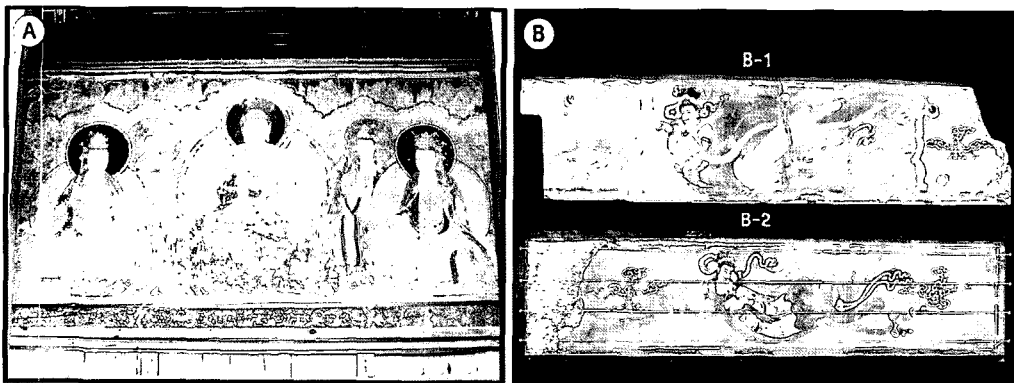


Figure 1. Views of murals housed since 2005 in the protective house. Of thirty murals kept in the house, 'A' is original painting of Three Buddha Mural drawn in 14th century. B-1 and B-2, Flying Angel Mural re-faced in 17th century. These murals were in the Hall of Paradise of Buddhism(Kukrakjeon) until 1984.

벽화보존각내에 안치될 1984년에 벽화들은 보존처리가 수행되었다. 보존처리는 주로 벽화의 균열과 테두리의 손상부분으로 처리부위는 육안으로 식별이 가능하다. 보존처리 부분 중에는 균열이 발생한 부분이 많으며 들뜬 부분도 있다. 벽화의 테두리가 불규칙하여 벽화를 보호하는 나무틀과의 사이에 공간이 발생한 경우는 석회를 사용하여 성글게 충전하였다. 벽화의 배면이 평탄하지 않은 경우에는 우레탄 폼으로 배면을 보강하기도 하였다. 벽화보존각내에서 전시 관리되어온 모든 벽화들은 새로이 건립된 벽화보존각으로 이전하여 보존처리 후 전시될 예정이다(Figure 1.).

2.2. 연구방법

자연적으로 박락된 벽화층 시료 10g과 진흙벽체에서 100g의 시료를 인수받아 현미경조사를 실시하고 벽화층 시료는 모드분석하고 벽체시료는 2군데에서 각각 20g을 분리하여 침강법으로 입도분석을 실시하였다. 채집된 시료의 층위를 구분하여 X-선 회절(Rigaku제 모델 D/Max-IIIB)분석을 실시하였다. 이후 구성입도에 기초하여 물성비교 시험벽체와 5cm 규격의 공시체를 제작하였다.

초음파를 이용한 물성조사에는 대벽화 2점과 형태가 다른 6점의 벽화가 조사되었다. 기기는 FARNELL, ENGLAND에서 제조된 PUNDIT이다. 초음파 전달시간은 4자리 Digital LCD로 제시되어 조사가 빨리 진행

되는 장점이 있고 파형을 볼 수 없는 단점도 있다. 단점을 보완하기 위해 측정은 가로세로 10 × 10cm 간격으로 데이터를 취득하였다. 측정방법은 Indirect transmission(간접법)이며 초음파 방출 및 수신을 위해 54kHz 압전 결정이 사용되었다.³

조사된 벽화는 박리박락, 입상분해, 균열 등의 물리적 훼손양상에 대해 훼손도면을 작성하였고 이를 초음파 측정을 통한 물성분포도와 비교하였다. 조사된 벽화의 표면 열화정도를 파악하기 위해 열적외선조사도 병행하였다. 조사기기는 FLIR ThernaCMA이며 벽화의 신속한 온도변화를 측정하기 위해 할로젠램프를 약 20~30여 분 벽화에 조사(照射)하고 변화를 측정하였다.

3. 벽체 재질 특성과 비파괴 진단

3.1. 벽체 구조와 재질 특성

무위사 벽화의 진흙벽체의 내부구조는 Figure 3과 같이 나무틀이 뼈대의 역할로 중앙에 있고 나무틀을 기준하여 전후로는 진흙이 발라져 있다. 나무틀에서 수직의 편편한 나무는 건물부재와 결구되어 벽체가 고정된다. 수평으로 연결된 나뭇가지는 껍질을 다듬지 않아 진흙이 잘 붙을 수 있다. 나무틀을 기준하여 전, 후에 사용된 진흙에는 자른 볏짚, 잔돌, 기와편이 혼합되어 있다. 이 진흙벽체에 기초하여 벽화층위가 형성되며 벽화가 그려진

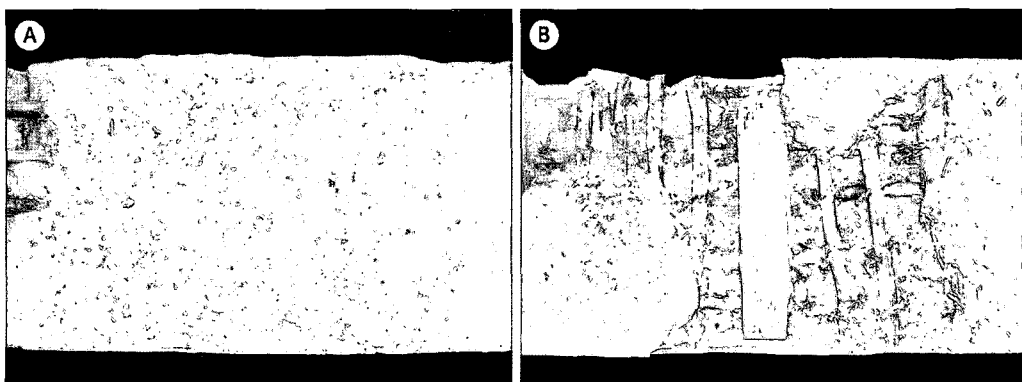


Figure 2. View of sample of mural wall. The sample made of natural soil collected with care(A), is about 12~13cm thick. Chopped straw mixed with soil and twigs were distributed in the center of the wall(B).

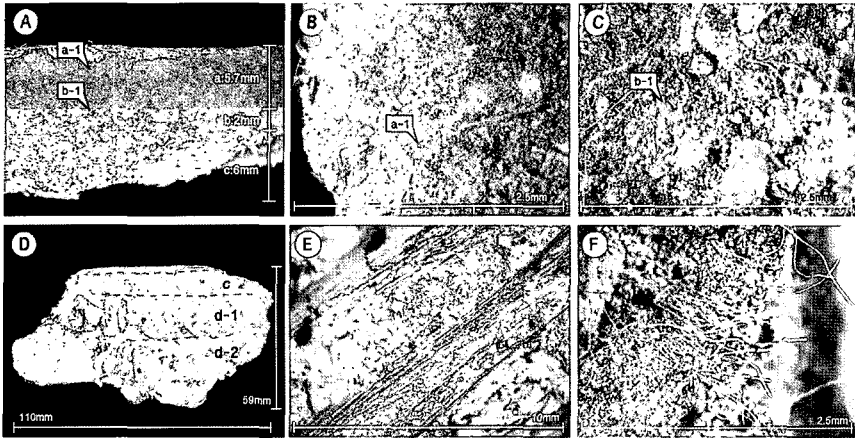


Figure 3. Microscopic observations of the mural-painted clay wall layer and body. Three layers shown in the section of the mural layer(A). a-1, the area where pigment soaked into the greeny mural-painted layer(B). b-1, the base of 0.2mm thick on the ochre coloured ground layer(C). While being identical ochre colour, there is visible dividing lines between d-1 and d-2 in the wall structure(D). Rice straw mixed with ochre coloured clay(E). Hyphae observed from the mural layer(F).

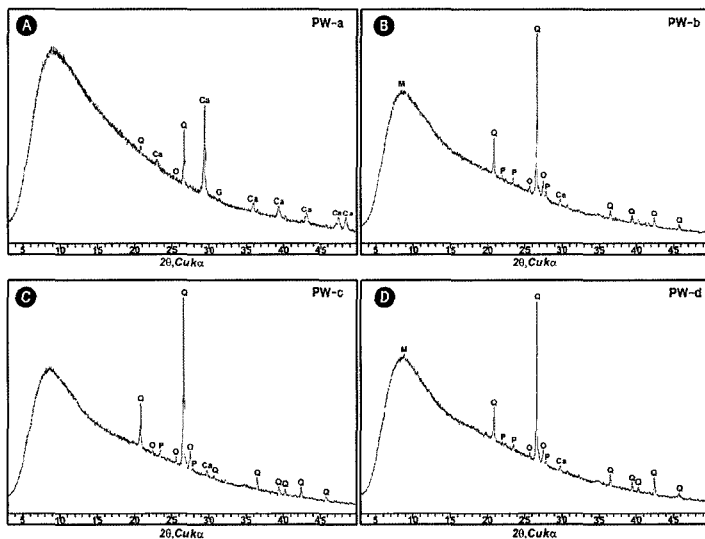


Figure 4. X-ray powder diffraction pattern showing the soil of mural. M: mica group minerals, Q: quartz, O: orthoclase, P: plagioclase, Ca: Calcite Sample: a-treatment mortar, b-repainting mural, c-original mural, d-inside soil wall.

벽체들의 두께는 약 12~13cm를 내외한다(Figure 2.).

벽화보존각내의 벽화에서 자연적으로 분리된 벽화층 파편과 벽체 파편을 현미경으로 관찰하였다. Figure 3의 벽화층 단면 A에서는 층위가 3개 있음을 확인할 수 있다. a층위는 표면의 흰 부분을 포함하여 약 5.7 mm이

고, b층위는 이 벽체에 그려진 최초의 벽화로 약 2mm이며, c층위는 거친 벽체의 표면을 다듬은 사벽층으로 약 7 mm를 내외한다. 각각의 층위에 대한 clay와 silt의 구성 입도는 a층위가 silt 6.2 wt.%, clay 77.1 wt.%, space 16.7 wt.%이며, b층위는 silt 22.2 wt.%, clay 57.4

wt.%, space 20.3 wt.% 이다. 사벽층은 silt 11.3 wt.%, space 22.6 wt.%, clay 66.2 wt.%이다.

D의 진흙벽층의 색상은 문셀토양색도집에서 10YR 6/4의 Light yellow brown에 해당하고 입자는 곱고 치밀하였으며 벚짚과 잔돌을 혼합하고 있었다. 동일하게 혼합된 상태이나 도시한 d-1과 d-2 사이에는 경계가 있다. 진흙벽체에 사용된 황토를 침강분리한 결과, gravel 1.78 g, sand 5.39 g, silt 4.91 g, clay 6.26 g이며, 부피비는 gravel 1.7 wt.%, sand 37.3 wt.%, silt 26.6 wt.%, clay 34.2 wt.%이었다. 채질과정의 손실과 혼합된 벚짚을 계량할 수 없었기에 총합에서는 약 1.66 g의 차이가 있다. 또한, D에는 흰 점액질의 애벌레 집이 있고 벽화 층위에서는 곰팡이의 균사로 추정되는 섬유질이 F와 같이 관찰되었다(Figure 3.).

벽화층과 벽체시료는 그 층위별로 보수물탈층(PW-a), 녹색벽화층(PW-b), 황색벽화층과 사질층(PW-c), 진흙벽체층(PW-d)으로 분리하여 X-선 회절분석을 실시한 결과, Figure 4의 그래프와 같이 분석된 모든 시료에서는 석영(Quartz), 정장석(orthoclase), 사장석(plagioclase), 방해석(Calcite), 점토광물(mica-group)이 공통 조성광물로 나타났고 PW-a에서만 석고(Gypsum)

가 나타났다(Figure 4.).

3.2. 물성 비교 시험체 제작

벽화의 벽체에 사용된 진흙은 주변에서 흔히 볼 수 있는 풍화토로 정선한 후 벚짚과 자갈을 혼합하였다. 벽화의 벽체는 뼈대 역할의 나무틀 전후로 약 10 cm정도 바른 진흙벽체가 기초이다. 그 후 평면을 고르기 위한 사벽층이 약 7~10 mm있으며, 그 위로는 그림을 그리기 위한 분장층(초지층)이 약 2 mm정도 있다. 이 벽화 벽체의 기본 구성에 대해서 단면으로 정리하여 Figure 8에 제시하였고 이에 기초하여 물성비교 시험벽체를 60 × 70 cm로 제작하였다.

시험벽체는 가공하지 않은 나뭇가지를 사용하여 뼈대 역할인 나무틀을 제작하고 새끼줄도 제작하여 사용하였다. 사용된 진흙은 최초 5 mm로 채질하여 유기물과 굵은 알갱이를 제거한 후 d-2에 사용하고 d-1은 다시 2 mm로 채질한 것을 사용했다. 이후 사벽층은 0.5 mm로 채질한 토양에 silt를 부피비 70 : 30으로 혼합하여 덧 붙여주고 분장층은 동일한 토양에 silt를 부피비 60 : 40으로 혼합하여 얇게 발랐다. 최고위층, 즉 그림이 그려지는 표면은

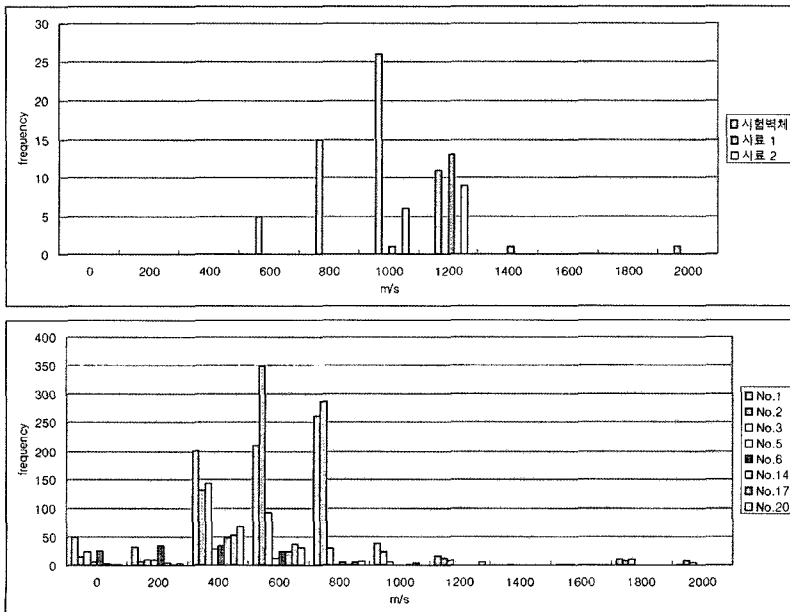


Figure 5. Frequency distributions of ultrasonic velocity of samples and mural-painted clay walls investigated.

채질된 도양에서 양금을 가라앉히고 이를 아교와 혼합하여 붓으로 덧발랐다. d-1과 d-2의 사용된 진흙은 벚짚이 혼합된 상태이고 사벽층에 사용한 토양과 구분하여 5 cm의 공시체를 각각 3개씩 제작하였다. 공시체는 sand, silt, clay로 혼합된 시료 1과 gravel, sand, silt, clay와 유기질(벚짚)이 혼합된 시료 2이다(Figure 5.).

3.3. 벽화 벽체의 초음파 탐상분석

조사된 모든 벽화와 시험벽체 및 공시체의 초음파속도는 최대, 최소, 평균으로 정리하고 환산한 일축압축강도를 Table 1에 제시하였다. 제시한 Table을 보면 조사된 벽화의 초음파속도는 범위가 71.63~3610.11%, 평균 417.44%이며 일축압축강도는 70.34~533.28 kg/

Table 1. Values of physical properties measured with mural-painted wall bodies, samples and standard hexahedrons samples

	ultrasonic velocity (%)			압축강도 (kg/cm ²)		
	max	min	Avr.	max	min	Avr.
Samjondo(No. 1)	3419.97	108.97	528.01	475.79	70.34	87.53
Amitanaeyongdo(No. 2)	3610.11	161.86	586.67	533.28	72.52	93.92
Obuldo(No.3)	1984.13	147.69	470.28	208.15	71.93	83.93
Gwaneumbosaldo(No.5)	684.93	150.26	294.48	98.15	72.04	71.71
Bosaldo(No. 6)	771.01	140.41	279.24	103.17	71.63	87.53
Bosaldo(No.14)	917.43	161.84	370.85	112.29	72.52	82.11
Juakbicheondo(No.17)	984.25	163.88	409.72	116.71	72.61	83.41
Juakbicheondo(No.20)	1070.1	71.63	400.3	122.7	73.3	83.7
total	3610.11	71.63	417.44	533.28	70.34	84.23
soil wall sample	1862.20	532.48	863.05	129.93	89.87	109.66
cube 1	1329.79	900.90	1239.41	142.54	111.22	135.48
cube 2	1392.76	1061.57	1232.39	147.83	122.05	134.95
total	1862.20	532.48	1,111.62	147.83	89.87	126.70

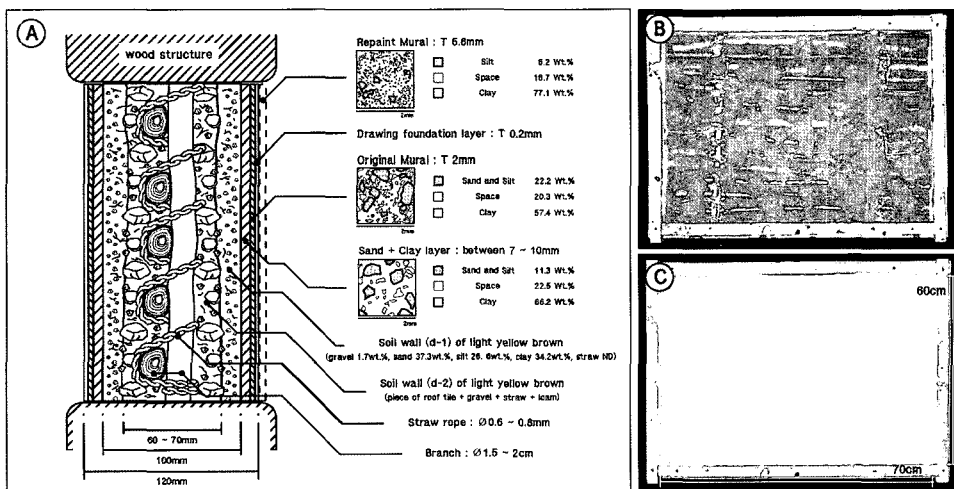


Figure 6. Views of the sections of a mural-painted wall and of samples. The samples (B,C) of wall body had been produced referring to the section of mural-painted wall smoothed(A).

Table 2. Representative ultrasonic velocity

soft materials		hard materials		the others	
weathering layer	300~900	granite	5000~6000	soft earthenware	900~2300
soil	250~600	basalt	5400~6400	hard earthenware	800~2000
alluvium	500~2000	metamorphic rock	3500~7000	roofing tile	800~1300
clay	1100~2500	sandstone	5000~4500	modern pottery	1900~5500
sand and gravel	(unsaturation) 400~500 (saturation) 500~1500	limestone	2000~6000		

cm², 평균 84.23 kg/cm²이다. 물성비교 시험체의 초음파속도 범위는 532.48~1862.20 %, 평균 111.62 %이며 일축압축강도 89.87~147.83 kg/cm², 평균 126.70 kg/cm²이다. 측정값을 이용한 빈도그래프는 Figure 6에 제시하였고 2000이상의 측정값은 빈도에 영향을 주지 못하여 제외하였다.

시험체들의 초음파 속도와 빈도그래프를 종합하면, 균질한 시료 1은 측정값이 고르고 유기물을 포함한 시료 2는 빈도가 2구간에 나타난다. 이는 유기물에 의해 초음파 속도가 다소 영향을 받았음을 의미한다. 그러나 평균값에서는 거의 차이가 없으므로 신선한 진흙의 초음파 속도 범위는 900.90~1392.76 %이며 평균 1235.9 % 정도 판단된다. 이 진흙을 사용한 시험벽체의 빈도분포는 600~1200 %에 분포하고 이 구간의 평균은 895.1 %로 시험벽체의 전체평균과 거의 유사하다. 따라서 균열 또는 결합이 없는 신선한 진흙벽체의 초음파 속도는 약 850 %을 내외라고 판단된다.

조사된 벽화의 초음파속도의 평균을 비교하면 보살도(No.6)〈관음보살도(No.5)〈보살도(No.14)〈주악비천도(No.20)〈주악비천도(No.17)〈오불도(No.3)〈삼존도(No.1)〈아미타내영도(No.2)의 순서이고 이들의 범위는 279.24~586.67 %이다. 삼존도(No.1)와 아미타내영도(No.2)는 신선한 시험벽체 평균의 절반에서 약간 상위에 있고 나머지 벽화들은 절반이하의 물성이다. 특히 보살도(No.6)와 관음보살도(No.5)는 물성이 매우 취약한 상태임을 단편적으로 판단할 수 있다(Table 2).

조사된 벽화의 물성 이해를 돕고 벽화의 물성을 진단하기 위해 Table 2를 제시하였다. 벽화는 일건된 진흙기에 미고결 물질에 해당하며 미고결 물질은 열에 의한

합성 또는 화학적 합성이 아닌 입자간의 단순한 결합상태이다. 예시한 자료에서 미고결 물질의 결합에 영향을 줄 수 있는 물질은 점토이며, 점토는 입자간의 공극을 충전하고 sand, silt와 같은 물질에 점토입자가 부착하는 경향이 있어 미세한 결합력이 커져 물성이 다소 높아질 수 있다.

그러나 미고결 물질의 결합은 압축과 관련이 깊으며 점토의 경우 압축 후 건조된 상태라도 수분 또는 물리적 영향을 받으면 쉽게 파손되고 자체적으로 회복되지 못한다. 따라서 진흙벽체의 물성을 판단하려면 점토에 대한 기초적인 연구가 먼저 이루어져야만 좀더 구체적인 접근이 가능할 것이다. 다만 여기서는 벽화보존을 위한 비파괴 물성조사의 시도이기에 Table 2에 예시한 자료에 기초하면서 벽화의 물성을 판단하고자 한다.

신선한 시험벽체의 초음파 속도는 점토, 모래와 자갈의 포화상태와 유사함이 있고 이 상태는 일건된 신선한 점토의 단단함에 견줄 수 있다. 그러나 시험벽체는 모래와 같은 입자가 섞여 있으므로 예시한 점토보다는 속도가 조금 낮아질 것이다. 또한 시료 1과 시료 2에서 나타난 결과로 보면 진흙의 초음파 속도는 공극과 유기물로 인하여 빈도분포 구간이 넓어질 뿐 평균에는 영향이 없었다. 따라서 자연상태에서 건조된 신선한 진흙벽체의 초음파 속도는 850 %을 내외라고 판단된다.

진흙이 수축팽창을 반복하여 발생한 미세균열은 오랜 시간이 경과하면 확장되어 초음파 속도에 영향을 줄 수 있다. 이때 초음파 속도는 예시한 자료에서 층적층이나 모래와 자갈의 포화상태와 유사할 것으로 판단된다. 확장된 균열로 인해 수분의 통기가 원활하게 되면 더욱 물성이 저하될 것이다. 이때 물성의 저하는 부분적인 현상

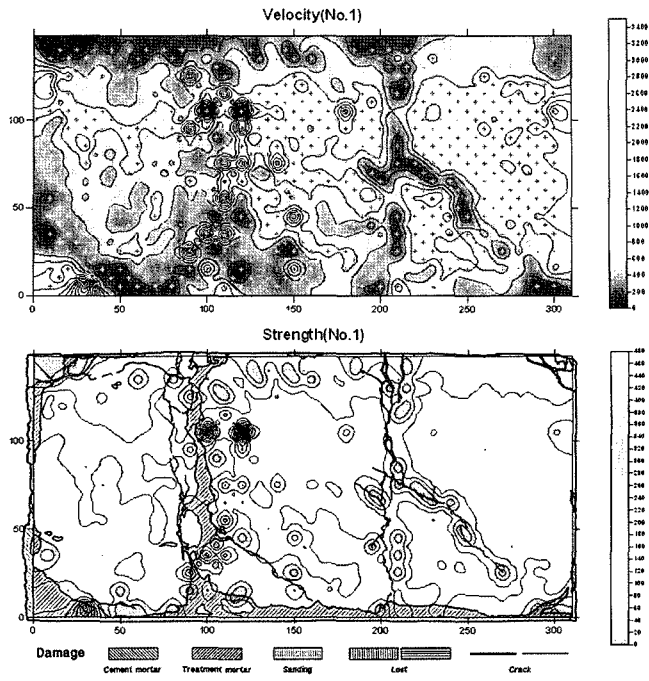


Figure 7. Distribution map and damage map showing physical properties. While the graph in top shows a distribution map of ultrasonic velocity, the one in bottom, the overlapped map of strength and damage.

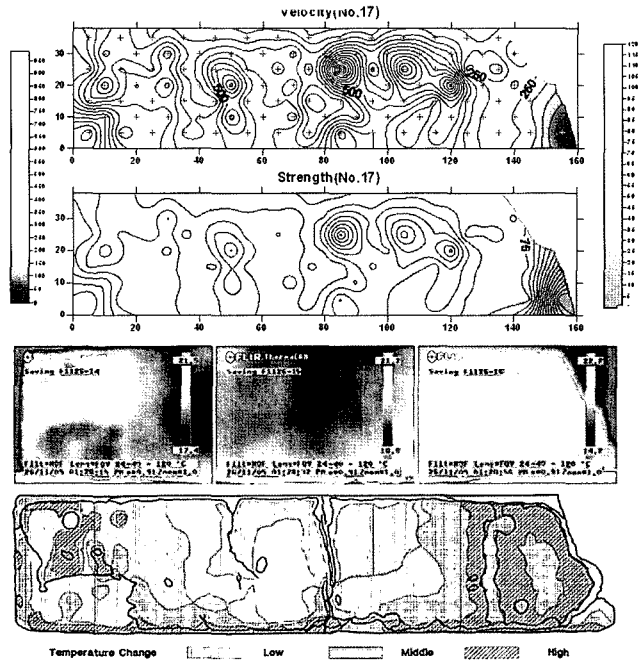


Figure 8. Distribution maps of physical property and infrared ray of the Juakbicheondo(No.17).

이기보다 전체적 또는 어느 정도의 범위에서 나타날 것이며, 이 시기의 초음파 속도는 800 %이하로 낮아질 것으로 예견되는 한편, 미세균열로 나타날 수 있는 초음파 속도의 저하는 미약하다고 판단된다. 이는 유기물을 포함한 시료 2에서 유기물로 인한 속도의 저하 현상을 확인할 수 없었기 때문이다.

600 %를 내외하는 초음파 속도는 미고결 물질 중 풍화층, 토양, 불포화상태의 모래와 자갈에 견줄 수 있다. 이는 앞서 살펴본 초음파 속도와 다른 양상으로 벽화의 물성이 급격히 악화되는 시점으로 판단된다. 이때 벽체는 점토의 결합력에 의존하기보다 서서히 작용한 압축압력에 의해 부분적으로 견고해지거나 다른 한편에서는 입자가 이완되어 물성이 낮아지거나 균열이 심화될 것이다. 따라서 한 화면에서 좌우측의 물성 차이가 심해지고 부분적인 편차도 심화될 것이다.

400 %를 내외하거나 이하의 초음파 속도는 미고결 물질에서 풍화층과 토양의 아래 범위에 있다. 이 속도의 벽화는 일반적인 토양의 일건된 상태로 보면 좋을 듯하다. 이는 이미 점토의 공극과 미세균열이 확장된 상태이고 입자간격을 충전하는 기능도 거의 소멸되어진 상태이다. 이는 벽화층과 진흙벽체의 입도분석에서 공간이 많은 점을 감안하여 판단하였다. 점토는 자체적으로 회복될 수 없는데 실례로 건조된 점토를 파쇄한 후 다시 수분

을 주면 점성은 생기지 않는다. 따라서 400 %를 내외하는 진흙벽체는 서서히 압축되어 견고할 뿐 물성은 취약해진 상태이다.

200 %를 내외하거나 이하의 초음파 속도는 풍화층과 토양의 아래 범위에도 속하지 못한다. 이 속도의 벽화는 일반적인 토양의 일건된 상태나 모래와 자갈의 불포화상태 이하라고 판단된다. 점토는 이미 입자간격을 충전하는 역할을 상실하고 점성도 거의 소멸된 상태이다. 또한 벽화에서 100 %이하의 초음파 속도는 물리적인 영향 없이도 입자가 자연분해 되면서 입상분해가 일어날 수 있는 상태이다. 한편, 현재 벽화에서는 압축하중에 의해 포화된 상태로 유지한 부분이 있을 수 있다.^{4,5}

3.4. 열적외선과 물성분포 분석

Figure 8은 삼존도(No.1)의 초음파속도 분포와 물성분포도이다. 물성분포도에는 훼손도면을 함께(Overlap) 도시하였다. 이 벽화는 좌, 우측이 물성에서 크게 차이를 보이며 부분적인 편차도 심하게 나타나고 있다. 균열부분의 주변은 초음파 속도가 200 %이하로 매우 약하게 나타나고 있다. 균열 주변은 매우 물성이 취약해졌다고 판단되는 한편, 초음파 속도가 균열을 반영하고 있다고 사료되기도 한다. 또한 보수부분을 중심으로 다

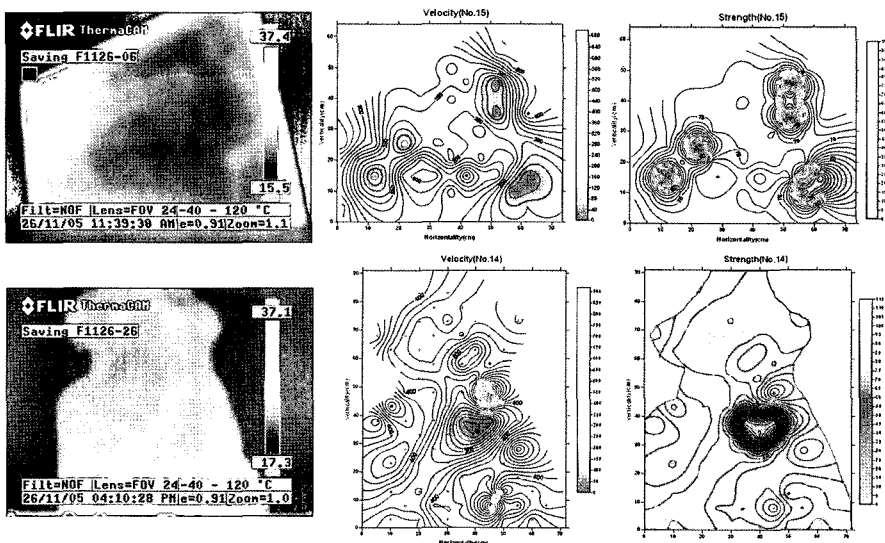


Figure 9. Distribution maps of physical property and infrared ray of the Gwaneumbosaldo(No.15)and Bosaldo(No.14).

소 높은 물성이 점점이 나타나고 있는 점은 보수 물탈의 물성이 높거나 두께가 두껍다고 판단된다.

Figure 8은 녹색바탕의 주악비천도(No.17)로 물성분포도와 열적외선 사진을 함께 제시하였다. 열적외선 사진을 보면 벽화의 중앙 하단과 벽화 좌, 우측에서 온도가 빠르게 변화하였다. 최고 온도는 21.5~22.2 °C를 보이는데 이때 실내온도는 18 °C였다. 이는 녹색바탕 벽화의 후면이 분리되어 기층을 형성하였거나 표면 물성이 저하된 상태이다. 물성분포도에서는 초음파 속도가 약 400 %를 내외하고 이는 신선한 시험벽체에 비해 중간정도로 조사된 벽화 중 다소 양호한 상태이다. 따라서 이 벽화에 나타난 초음파속도는 벽체의 물성을 반영하고 있으며, 열적외선에 나타난 현상은 녹색바탕 벽화의 표면상태로 불안정한 상태라고 판단된다.

Figure 9에서 관음보살도(No.5)와 보살도(No.14)의 열적외선 사진과 물성분포도를 비교한 결과, 관음보살도의 경우 온도변화가 빠르게 변화한 부분은 물성분포도에서 낮은 물성을 보이는 부분과 거의 일치하였다. 그러나 보살도는 하단, 중앙의 사선방향, 머리의 후광 주변에서 빠른 온도변화를 보였으나 물성분포도에서는 물성이 유사하게 나타나는 한편, 중앙부분에 매우 낮은 물성이 나타났다. 이는 열적외선의 온도변화가 표면의 상태를 지시하고 초음파속도는 표면보다 내부의 물성을 반영하는 것임을 확인하였다.

4. 보존과학적 고찰

우리는 진흙을 일반적으로 황토라 칭하고 있으나 학술적인 용어로 황토는 "바람에 의해 운반되어 퇴적된 담황색 내지 황회색을 띠는 실트질 퇴적물"로 풍성퇴적물의 황토(loess)를 말한다. 즉 우리나라의 황토는 암석이 화학적 풍화작용을 받아 변질되어 토양화된 풍화잔류토(풍화토)를 말한다.⁶ 풍화잔류토는 주변암석의 조암광물을 반영하는데, 강진군 성전면 일대에 분포하는 홍색장석화강암은 조암광물로 석영, 정장석, 피어다이트, 사장석, 흑운모가 있고 불투명광물, 각섬석, 견운모와 인회석 등을 수반한다.⁷ 이에 근거하면 벽화시료의 XRD분석에서 나타난 방해석과 석고의 기인은 좀 더 정밀한 분석연구가 필요하다.

전통목조건축물의 벽체는 내부에 뼈대의 역할로 나무틀을 세우고 전후로는 진흙을 바른다. 최초 진흙이 발라지는 층위를 진흙벽체라 하고, 이에 기초하여 초벽진흙층, 사벽층, 분벽층(재 사벽층)의 순으로 만든 후 벽화가 그려진다.⁸ 조사된 벽화의 제작수법은 이와 거의 유사하다. 진흙은 gravel, sand, silt 등의 입자가 점토에 혼합된 상태를 칭한다. 점토는 수분의 흡착·흡수에 의한 용적변화, 가스성, 점착성 등의 물리적 특성이 우수한 풍화산물이며 실트는 주변의 점토를 부착하는 경향이 있고 모래는 진흙의 골격 역할을 한다.⁹

진흙벽체에 혼합된 작은 돌과 기와편은 부피축소를 완화하고 나무틀에 끼워지면 진흙벽체가 건조되고 수축되는 과정에서 작은 돌과 기와편의 요철로 인해 벽체가 물러지게 된다. 진흙에 혼합된 벚짚은 균열을 완화하고 탈락을 방지한다. 벽체 내부의 나무틀은 목조건축물 부재와 연결되어 진흙벽체를 고정한다. 그러나 이 나무틀은 중앙에 위치하여 벽체를 양분시키는 요소가 있다. 벽체가 제작 초기부터 건조과정에 나무틀과 분리된다면 수평인력은 감소하고 수직 하중이 증가하여 벽체의 중앙이나 하단에 배불림 현상이 나타날 수 있다. 이는 벽체의 탈락으로 이어질 수 있는 중요한 현상이다.

초음파 속도의 평균으로 보았을 때 조사된 벽화의 물성은 보살도(No.6)〈관음보살도(No.5)〈보살도(No.14)〈주악비천도(No.20)〈주악비천도(No.17)〈오불도(No.3)〈삼존도(No.1)〈아미타내영도(No.2)의 순서이고 벽체의 물성의 파악하기 위해 제작한 공시체, 시험벽체의 초음파 속도를 보면 신선한 진흙벽체의 초음파 속도는 850 %를 내외한다. 이에 근거하여 벽화의 물성을 단편적으로 판단할 수 있었다.

또한 제시한 Table 2에 근거하여 벽화의 초음파 속도의 평균을 살펴본 결과, 진흙벽체는 미고결 물질로 신선한 진흙벽체는 초음파 속도 850 % 내외를 나타낼 수 있음을 확인하였고 최초 건조된 후 발생하는 미세한 현상들은 초음파 속도에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 벽화에서 800 %이하의 초음파 속도는 입자간의 결합이 약화된 상태를 의미하고 입자구성이 불균질 부분은 균열이 발생할 수 있다. 한편, 조사된 벽화들의 급격한 물성변화 시기는 600 %내외로 예측되었다.

초음파 속도가 400 %를 내외하는 경우가 많았다. 이때 벽체의 상태는 점토의 공극과 균열이 확장되어진 상

대로 점토의 점착 충전 기능은 기대할 수 없다. 이는 벽화층과 벽체의 현미경 조사에서 구성입자 사이에 공간이 많은 점을 감안하여 판단한 것이다. 따라서 400 %를 내외하는 벽화는 서서히 압축되어 견고할 뿐 물성은 매우 저하된 상태이다. 벽화에서 200 % 또는 100 %이하는 벽화의 물성이 매우 취약한 상태로 입자들은 압축에 의해 현존하거나 입자의 마찰 면에 의해 유지할 뿐이다. 따라서 보존처리 과정에서는 먼저 입자를 접촉한 후 공간을 충전하는 순서로 진행해야 할 것으로 사료된다. 벽화 보존처리 수법에 대해서는 이미 제시된 바 있다.¹⁰

전통 목조건축물 토벽체의 비파괴 안전진단방법에 대해서는 현재 효과적인 방법이 제시되지 않았고 유용할 사례도 전무하기에 이번 초음파탐상은 물성분포도와 정밀훼손도면 및 열적외선 사진을 비교하여 검토하였다. 이 결과, 초음파 측정은 벽체의 물성을 반영하고 가시적으로 확인할 수 없는 내부균열, 물성저하, 들뜸 현상 등을 살펴볼 수 있었으며 과거 보수 몰탈의 물성도 판단할 수 있었다.

열적외선 조사는 비록 표면에 한정된 변화였으나 표면의 물성 상태가 가시화 되어 보존처리에 필요한 기초 자료를 효과적으로 제시할 수 있었다. 다만 열적외선 조사는 규모가 큰 벽화나 외부 환경에 있는 벽화에서는 할로겐을 조사해도 온도의 편차가 발생하지 않아 조사를 수행할 수 없었다. 열적외선 조사는 벽화보존관리에 매우 효과적인 수단이라 사료되기에 이 방면의 연구가 필요하다.

앞의 내용들을 모두 종합하여 전통목조건축물을 장식한 벽화 벽체의 비파괴 조사수법과 진단방법은 초음파 탐사를 통해 보존관리에 필요한 자료는 충분히 확보할 수 있었으나 평균값과 빈도분포로는 벽화의 물성을 단언할 수 없었다. 진흙벽체에 대한 심도 있는 진단은 벽체를 구성하는 재질의 물리적 특성, 재질의 다양한 시험평가 등에 기초해야 한다고 사료되며 이번 조사연구가 앞으로 벽화보존을 위한 비파괴 진단연구의 초석이 될 수 있기를 바라는 마음이다.

5. 결론

1. 강진 무위사 벽화보존각내 보존된 벽화의 벽체에

사용된 진흙을 분리한 결과, 벽체 진흙은 gravel 1.78 g, sand 5.39 g, silt 4.91 g, clay 6.26 g이고 부피는 gravel 1.7 wt.%, sand 37.3 wt.%, silt 26.6 wt.%, clay 34.2 wt.%이다. 벽화층의 3개 층위는 a층위가 silt 6.2 wt.%, clay 77.1 wt.%, space 16.7 wt.%이고 b층위는 silt 22.2 wt.%, clay 57.4 wt.%, space 20.3 wt.% 이며 c층위는 silt 11.3 wt.%, space 22.6 wt.%, clay 66.2 wt.%이다.

2. 조사된 8개 벽화의 초음파 속도 평균은 보살도(No.6)〈관음보살도(No.5)〉보살도(No.14)〈주악비천도(No.20)〉주악비천도(No.17)〈오불도(No.3)〉삼존도(No.1)〈아미타내영도(No.2)의 순서이고 초음파속도 범위는 71.63~3610.11 %, 평균 417.44 %이며 일축압축강도 70.34~533.28 kg/cm², 평균 84.23 kg/cm²이다. 물성비교 시험체의 초음파속도 범위는 532.48~1862.20 %, 평균 111.62 %이며 일축압축강도 89.87~147.83 kg/cm², 평균 126.70 kg/cm²이다.
3. 조사된 벽화, 시험체, 예시한 자료를 종합하면 신선한 진흙벽체의 초음파 속도는 약 850 %을 내외이고 최초 발생한 미세균열이 확장되어 물성이 저하되면 800 %이하로 예견되는 한편, 600 %내외에서 벽체의 물성저하 또는 물성차이가 현저해 진다. 400 %를 내외는 진흙벽체가 서서히 압축되어 견고할 뿐 물성은 취약해진 상태이며 200 %를 내외하거나 이 이하는 물리적인 영향 없이도 진흙벽체가 입상분해가 발생하는 상태이다.
4. 초음파 속도에 의한 물성분포도와 정밀훼손도면 및 열적외선 사진을 비교 검토한 결과, 초음파 탐상은 벽체의 미세적인 물성을 반영하고 있으며 육안으로 관찰할 수 없는 이동성 균열, 균열, 들뜸 현상에 대한 추정이 가능하였다. 또한 보수 몰탈의 물성과 상태도 판단할 수 있었다. 열적외선의 경우는 비록 표면에 한정된 상태이기는 하였으나 보존처리에 필요한 기초 자료를 가시적으로 제시하는데 효과적인 수단이었다.

사사

이 연구는 건국대학교 부설 회화보존연구소의 지원을 받아 완성되었으며 연구가 이루어 질 수 있도록 조언해 주신 분과 현장 조사에 협조해 주신 모든 연구진께 감사를 표한다.

참고문헌

1. 강형대, 정광용, 홍두식, "신흥사 대광전 벽화의 과학적 조사". *문화재*, 26, (1993).
2. 한경순, "신흥사 대광전 벽화 보존처리 보고서". *경주대학교 부설 문화재연구소 학술보고서*, (2002).
3. 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, "지반환경물리탐사", *시그마프레스*, (2003).
4. 서만철, 송인선, 최희수, "암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전진단" *지구물리학회지*, (2001).
5. 이성민, 박현규, 서만철, 이수곤, "우리나라 홍예교의 동적 구조 특성에 관한 연구", *대한건축학회*, 17권(9), (2001).
6. 박현진, 황진연, 양경희, 김준식, 조원모, 강수원, 안병석, "황토(풍화토)의 입도 분리에 따른 물리화학적 특성". *한국광물학회·한국암석학회, 공동학술발표회 논문집*, (2001).
7. 김정빈, 윤정한, 김정택, 박재봉, 강상원, 김동주, "월출산지역에 분포하는 중생대 화강암류에 대한 암석화학적 연구". *자원환경지질*, 27, No 4, 375-385 (1994).
8. 조윤경, "한국벽화의 형성과 제작기법에 대한 연구". *경희대학교 석사학위*, (2000)
9. 황진연, 장명익, 김준식, 조원모, 안병석, 강수원, "우리나라 황토(풍화토)의 구성광물 및 화학성분". *한국광물학회지* Vol. 13 No. 3, (2000).
10. 김순관, "벽화문화재의 과학적 보존처리". *보존과학기초연수교육*, 국립문화재연구소, 243-258 (2004).