

# 낙성대 삼층석탑 보존처리 사례 연구

The Case Study on the  
Conservation of Three-storied  
Stone Pagoda at Nakseongdae

김영택<sup>1,\*</sup>, 이용운<sup>1</sup>, 조성남<sup>2</sup>,  
이주목<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> 주식회사 담원문화유산 Damwon Cultural  
Heritage Inc., <sup>2</sup>(前) 주식회사 담원문화유산  
해동문화유산 Hyaedong Cultural Heritage

Kim Yeongtaek<sup>1,\*</sup>, Lee Yongwoon<sup>1</sup>,  
Jo Sungnam<sup>1</sup>, Lee Jumok<sup>1</sup>

<sup>1,\*</sup>Damwon Cultural Heritage Inc.

<sup>2</sup>Hyaedong Cultural Heritage

\* Corresponding Author:  
Kim Yeongtaek

Tel : 82-2-485-0709  
E-mail : halloyt@hanmail.net

## 요약

야외 석조문화재는 다른 문화재에 비해 양적인 면에서나 규모 면에서의 한계로 인해 많은 인력을 필요로 하는 작업으로 보존처리 회사가 많은 부분을 담당하고 있다. 이 연구에서는 서울지역 관악구에 위치하는 낙성대 삼층석탑을 대상으로 실시한 보존처리 사례를 소개하고자 한다. 이를 위해 석조문화재의 보존 상태와 훼손 현황을 살펴보고 보존처리 사용 재료 및 방법에 대해서 정리하였다. 낙성대 삼층석탑과 같이 도심에 위치하는 석조문화재의 표면오염은 지역적인 특징이 나타나게 되며 이에 따라 보존처리 기법의 적용이 차별화되어 이루어지게 된다. 향후 박물관 소장 야외 석조문화재 뿐만 아니라 서울지역 석조문화재의 보존처리에 참고자료로써 활용되기를 기대한다.

**주제어** : 서울지역, 석조문화재, 무기오염물, 표면세척

## Abstract

Conservation treatment of stone cultural properties in the open air is mainly conducted by companies specialized in conservation treatment. This study presents cases of conservation treatment of stone cultural properties housed outdoors in Seoul, including the Three-story Stone Pagoda at Nakseongdae in Gwanak-gu. The present condition of and damage to stone cultural properties are investigated and the materials and techniques used for conservation treatment are presented. The contamination on the surface of stone cultural properties located in downtown areas shows features specific to the related areas, meaning each case requires tailored conservation techniques. This study is expected to serve as reference for future conservation treatment of stone cultural properties in Seoul as well as others in museum collections exhibited outdoors. It is hoped that the cases presented in this study can become widely known to people in charge of conservation treatment in the private and public sectors to improve the quality of conservation treatment applied to stone cultural properties.

**Keywords** : Seoul Area, Stone Cultural Heritage, Inorganic contaminants, Surface Cleaning

투고일: 2020. 4. 6. 심사(수정)일: 2020. 5. 6. 게재확정일: 2020. 5. 10.

## 1. 서론

일반적으로 석조문화재를 구성하는 암석의 풍화속도는 다른 재질에 비하여 매우 느린 것으로 알려져 있으나 일단 풍화가 진행되면 물리·기계적, 생물학적 및 화학적 손상이 복합적으로 활발하게 발생하게 된다. 또한 석조문화재의 대부분은 야외에 있어 자연적, 인위적인 훼손에 노출되어 있는 것이 현실이다. 현대에는 산성비와 대기오염 등의 환경적인 요인에 의해 손상이 가중되어 석재가 풍화단계 진입했거나 이미 상당부분 풍화과정을 겪으면서 취약한 상태에 처한 석조문화재가 다수에 이르고 있는 실정이다.

최근 석조문화재의 풍화와 물리화학적 변화에 관련된 암석학적 특징 및 풍화특성에 관한 보존과학적 연구가 활발하게 진행되어왔다. 이와 함께 보존처리제와 처리 기술들이 개발되고 현장에 적용되어 많은 발전이 이루어졌다<sup>[1-6]</sup>.

본 연구에서는 야외에 위치하는 낙성대 삼층석탑을 대상으로 보존상태를 조사, 분석하고 그에 따른 보존처리를 실시하였으며, 그 사례에 대해서 기술하고자 한다.

## 2. 낙성대 삼층석탑 보존 현황

낙성대 삼층석탑은 고려시대 인헌공 강감찬(仁憲公 姜邯贊, 948~1031) 장군을 기리기 위해 그의 생가 터에 세워졌던 것이다. 1974년에는 강감찬 장군을 위한 사당을 지어 ‘안국사’라 이름하고 주변을 정비하면서 석탑을 현재의 위치로 이전하였다. 1층 탑신에는 ‘강감찬 낙성대(姜邯贊 落星堡)’ 글씨가 각자되어 있다. 현재 상륜부는 유실되어 남아 있지 않다<sup>(도1)</sup>.

낙성대 삼층석탑의 주요 훼손현황은 탑신석과 면석에서 확인되는 균열, 갑석과 면석 사이의 시멘트 몰탈 및 옥개석 상부 이끼류 등의 생물오염물과 갈색변색, 흑화 오염이다.

남측면에는 상대갑석과 기단석 면석 사이에 시멘트 몰탈이 보이고 1층 탑신석 좌측부분에 균열이 관찰된다. 동측면은 좌측 지대석 일부가 탈락되어 있고 기단 면석 좌측부분에 표면 오염이 확인된다. 또한 기단갑석 상부와 1층 탑신석 사이 및 탑신석과 옥개석 사이의 시멘트 몰탈이 보이며 1층 옥개석 상부에 흑화 오염 및 이끼류가 확인된다. 남측과 동측면 2층 옥개석 상부에는 일부 고착지의류가 서식하고 있다.

북측면의 경우 지대석과 기단 면석 전면에 흑화 오염이 확인되며 기단 갑석 상부와 1층 탑신석 사이에 시멘트 몰탈이 확인된다<sup>(도2)</sup>. 또한 각 층의 옥개석 상부에 생물 피복이 확인된다. 서측면의 경우 기단석 면석 우측 상부 일부가 탈락해 있고 기단갑석, 각층 옥개석 상부에 흑화 오염물과 생물오염이 확인된다. 특히 석탑 전반에 걸쳐

기단 면석, 탑신석과 옥개석에서 갈색 변색과 흑화 오염물로 암석의 표면이 피복되어 있는 상태이다<sup>(도3)</sup>.



(a) 남측면  
(b) 서측면

도1. 낙성대 삼층석탑 전경



도2. 부재 사이 시멘트 몰탈 현황



도3. 흑화 피복 및 생물 오염

### 3. 보존처리 개요

낙성대 삼층석탑의 보존처리 사업은 2018년 9월 28일 착공하여 11월 29일까지 2개월간 집중적으로 진행하였다<sup>(표1)</sup>. 예비조사와 가설공사, 조사·분석을 선행하고 샘플테스트, 세척 및 미세블라스팅, 시멘트 몰탈 제거, 수지처리와 암석강화처리의 보존처리를 수행하였으며, 2회에 걸쳐 현장 자문회의를 개최하였다<sup>(표2)</sup>. 조사·분석과 보존처리는 5명의 참여인원이 수행하였다.

표1. 보존처리사업 일정

항 목		일 정
계약		2018년 09월 28일
착공		2018년 10월 01일
예비조사		2018년 10월 04일 ~ 2018년 10월 05일
가설공사		2018년 10월 11일 ~ 2018년 10월 12일
현장 조사분석		2018년 10월 15일 ~ 2018년 10월 16일
조사분석 데이터 정리 및 해석		2018년 10월 17일 ~ 2018년 10월 28일
보 존 처 리	샘플테스트	2018년 10월 12일 ~ 2018년 11월 26일
	세척 및 미세블라스팅	
	몰탈 제거	
	수지처리	
	암석강화처리	
현장 자문회의		2018년 10월 18일 / 2018년 11월 23일
준공		2018년 11월 29일

표2. 보존처리사업 주요내용

예비조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 보존처리공사 전에 예비조사를 통해 낙성대 삼층석탑의 현황을 파악하여 이에 적합한 시공 준비를 함.</li> <li>- 사진촬영과 처리 전 상태를 기록하여, 보존처리 전·후를 비교할 수 있도록 함.</li> </ul>
가설공사	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 보존처리공사 전 공사안내판을 설치함.</li> <li>- 석탑 주변으로 가설구조물 및 보호막을 설치함.</li> </ul>
조사·분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 석탑의 훼손요인을 확인하고 풍화훼손지도를 작성함.</li> <li>- 석탑 구성암석 재질특성을 파악함.</li> <li>- 비파괴 진단을 통해 석탑부재의 물성을 측정함.</li> <li>- 석탑 표면에서 확인되는 표면오염현황을 분석함.</li> </ul>

물탈 제거	- 석탑 표면에 사용된 기존의 물탈은 물리적인 방법으로 제거하되, 석재 표면이 손상되지 않도록 함.
세척	- 석탑표면의 지의류 및 흑화, 기타오염물에 대한 세척을 실시함. - 부드러운 솔 및 대나무 칼을 이용하여 건식세척을 하고, 증류수와 솔을 이용하여 습식 세척을 실시함.
미세블라스팅	- 건식세척과 습식세척으로 제거되지 않는 흑화 무기오염물은 미세블라스팅을 이용하여 제거함.
수지처리	- 균열부 및 물탈제거부는 석재용 에폭시수지와 혼합제, 동일 암종의 석분을 이용하여 충전·보강하고, 원 석재와의 이질감이 없도록 표면처리를 실시함.
암석강화처리	- 석탑 표면에 에틸실리케이트계 암석강화제를 2회 분무처리함.
보고서 제작	- 보존처리 공사 전반의 내용과 사진자료를 수록한 보고서를 발간함.

#### 4. 보존과학적 조사·분석

보존처리에 앞서 낙성대 삼층석탑의 훼손지도를 작성하여 유형별 풍화 양상을 분류하였다. 석탑을 구성하는 암석의 재질특성을 파악하기 위해서는 실체현미경 조사를 통해 기계적 특징을 살펴보았으며, 편광현미경 관찰, X-선 회절분석 및 전암대자율 측정을 실시하여 암석광물학적 특징을 확인하였다. 또한 각 표면오염물에 대한 휴대용 XRF 및 주사전자현미경 분석을 수행하였다<sup>(도4)</sup>.



a b c  
(a) 실체현미경 관찰  
(b) 전암대자율 측정  
(c) 표면오염물 분석  
(P-XRF)

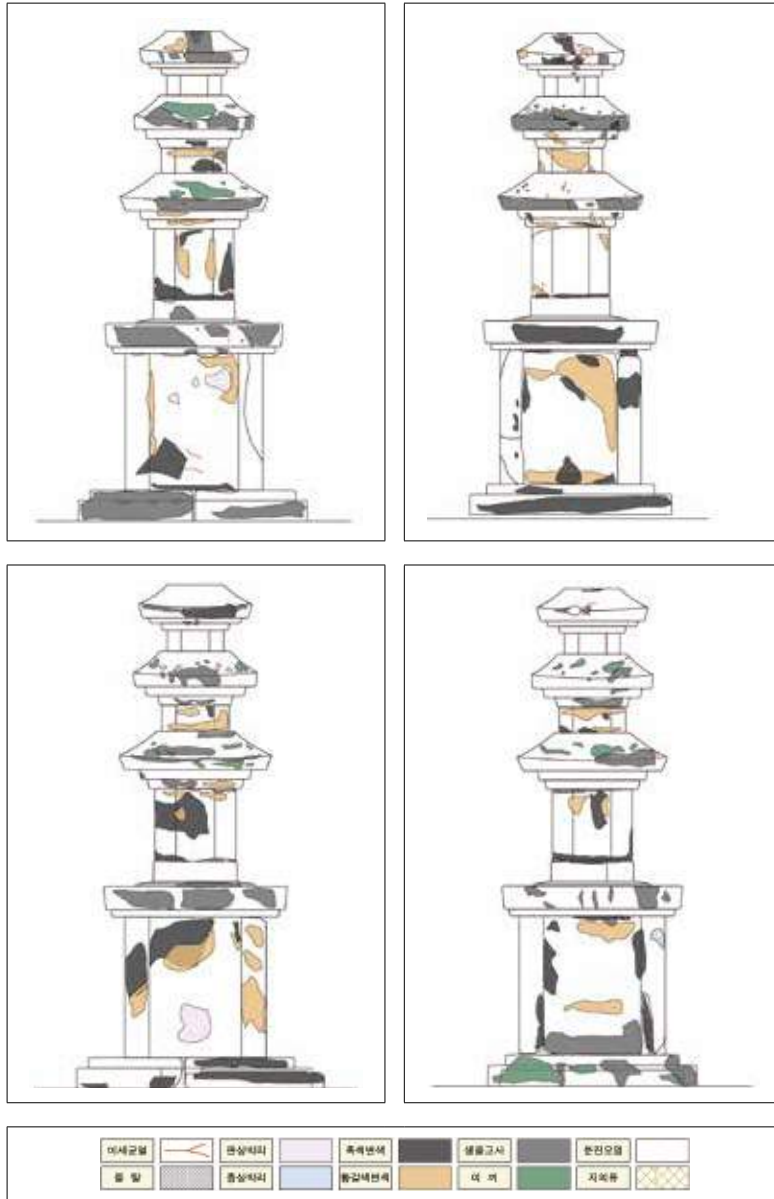
도4. 현장 조사·분석

##### 4.1. 풍화훼손지도

낙성대 삼층석탑의 방위별 풍화훼손지도를 작성하였다. 각 훼손 요인을 미세균열, 판상박리, 층상박리, 물탈, 흑색변색, 황갈색변색, 생물고사(흑화), 이끼 및 지의류로 구분하여 면적을 도시화하였다. 이 석탑의 주된 훼손 양상은 판상박리의 기계적 풍화와 갈색 및 흑색변색의 표면오염으로 나타났으며, 부분적으로 균열이 발생된 것을 확인하였다<sup>(도5)</sup>.

a	b
c	d

- (a) 남측면  
(b) 동측면  
(c) 북측면  
(d) 서측면



도5. 풍화훼손지도

#### 4.2. 구성암석의 재질특성

낙성대 삼층석탑을 구성하는 암석은 크게 두 종류이며, 육안관찰에서 담회색과 담홍색으로 명확하게 구분된다. 3층 탑신을 제외한 모든 부재는 담회색을 띠며, 3층 탑신에서만 담홍색화강암이 관찰된다. 먼저 담회색을 띠는 화강암은 입상조직을 보이며, 입자크기는 1~3mm로 중립질에 해당한다. 조암광물로는 석영, 장석 및 운모



가 관찰되며, 대부분 유사한 입자크기를 보이지만 운모류는 다소 작은 크기를 갖는다. 장석은 대부분 사장석으로 구성되며, 운모는 대부분 흑운모가 산출되지만 미량의 백운모가 관찰된다. 부재에 따라 흑운모의 함량에는 다소 차이가 있지만 전반적인 기재적 특징으로 볼 때, 담회색중립질흑운모화강암으로 동정할 수 있다<sup>(도6)</sup>.



(a) 산출상태  
(b) 실체현미경 사진

도6. 담회색중립질흑운모화강암의 기재적 특징

3층 탑신은 다른 부재와 달리 담홍색이 뚜렷한 특징을 보이며, 풍화에 의한 변색이나 손상이 적은 신선한 면이 표면에 다수 노출되어 있다. 중립의 입상조직을 보이며, 조암광물로는 석영, 장석 및 운모가 관찰된다. 담회색중립질화강암은 대부분 사장석으로 구성된 것과 달리 담홍색을 띠는 K-장석이 다수 분포한다. 또한 다른 부재들과 흑운모의 함량에서 명확한 차이를 보인다<sup>(도7)</sup>.



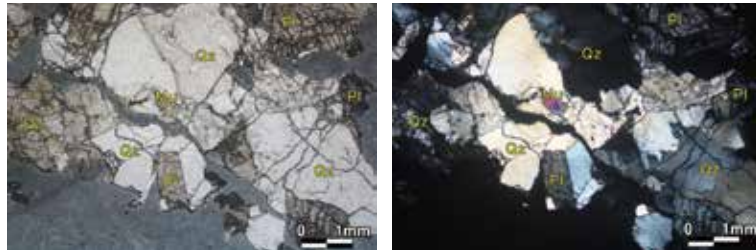
(a) 산출상태  
(b) 실체현미경 사진

도7. 담홍색중립질화강암의 기재적 특징

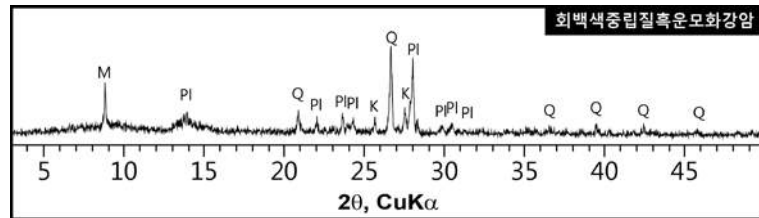
구성암석의 암석 및 광물학적 특징을 확인하기 위해 부재 사이에 탈락된 미량의 담회색중립질흑운모화강암 시편을 수습하여 박편을 제작하고 편광현미경 관찰을 수행하였으며, X-선 회절분석을 통해 조암광물의 종류를 정성적으로 파악하였다.

편광현미경 관찰결과, 육안으로 관찰한 석영, 사장석, 백운모를 확인하였으며<sup>(도8)</sup>, X-선 회절분석 결과에서도 석영, 사장석, 정장석 및 운모가 동정되었다. 육안으로는 거의 관찰할 수 없었던 K-장석을 X-선 회절분석을 통해서 뚜렷하게 확인하였다<sup>(도9)</sup>.

a b  
(a) 개방니콜  
(b) 직교니콜



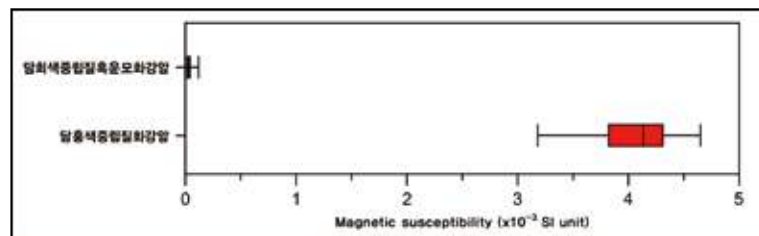
도8. 담회색중립질흑운모화강암의 편광현미경 사진



도9. 회백색중립질흑운모화강암 X-선 회절분석 결과 (M:운모, PI:사장석, Q:석영, K:K-장석)

화성암의 특성을 분류하기 위한 연구의 한 수단으로 응용된 전암대자율은 외부 자기장에 대한 자화강도를 뜻하며,  $I = k \cdot H$ 로 정의된다. 여기서  $I$ 는 자화강도,  $H$ 는 자기장,  $k$ 는 대자율을 뜻한다. 자화강도를 통한 화강암의 분류는 대자율  $1.256(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 을 기준으로 자철석 계열과 자철석을 함유하지 않는 티탄철석 계열로 분류한다<sup>[7]</sup>. 이는 암석의 동질성을 파악하는 데 효과적이어서 국내·외 석조문화재의 산지를 해석하는 방법론으로 적용되어 원형복원에 활용도가 높다<sup>[8-10]</sup>.

낙성대 삼층석탑을 구성하는 부재 13개에 대해 전암대자율을 각각 10회씩 측정하였다. 이를 암종에 따라 구분하였으며, 측정한 값들을 다이어그램에 도시하여 분포양상을 살펴보았다<sup>(도10)</sup>. 이 결과, 담회색중립질흑운모화강암과 담홍색중립질화강암은 명확히 구분된 분포양상을 보인다. 담회색중립질흑운모화강암은  $0.006 \sim 0.119$ (평균  $0.035 \times 10^{-3} \text{ SI unit}$ )의 범위를 보이며, 담홍색중립질화강암은  $3.180 \sim 4.650$ (평균  $4.101 \times 10^{-3} \text{ SI unit}$ )의 값을 갖는다.



도10. 낙성대 삼층석탑 구성암석의 전암대자율 분포



일반적으로 동일한 기원의 마그마 암체 내에서도 정치환경에 따라 전암대자율의 차이가 발생하기도 한다. 그러나 낙성대 삼층석탑에 사용된 두 암석은 기재적 특징에서 다소 다른 차이가 관찰되며, 풍화도에서도 차이가 있는 것으로 보아 3층 탑신석이 복원재로 사용되었을 가능성이 제기된다. 두 암석의 동질성을 명확히 파악하기 위해서는 화학분석과 같은 정량분석이 추가적으로 필요하다.

#### 4.3. 표면오염물 분석

낙성대 삼층석탑에서는 다양한 표면오염물이 관찰되며, 화학적인 요인에 의한 변색과 생물에 의한 피복으로 나뉜다. 화학적인 요인에 의한 변색은 위치와 진행정도에 따라 흑색, 갈색, 황색 등 다양한 색상을 띤다. 이는 석탑 전반에 걸쳐 관찰되며, 특히 남측 기단에 넓게 분포한다. 생물에 의한 피복은 주로 옥개석의 상면에 널리 분포하며 조류, 지의류, 선태류 등이 확인되었으며, 과거 보수에 사용된 시멘트 모르타르도 관찰된다<sup>(도11)</sup>.

석탑 표면에서 관찰되는 오염물 중 화학적 손상을 중심으로 변색지점과 표면에 피복된 형태의 오염물을 함께 측정하여 총 11지점에 대한 X-선 형광분석을 수행하였다. 분석에는 시료의 수습 없이 비파괴로 표면의 성분을 확인할 수 있는 P-XRF(Oxford사의 X-MET7500) 장비를 사용하였다. 오염물 성분의 동정을 위해 신선부의 측정값을 함께 획득하여 비교하였다<sup>(표3)</sup>.



(a) 표면변색  
(b) 지의류  
(c) 선태류  
(d) 모르타르



도 11. 낙성대 삼층석탑의 표면오염물

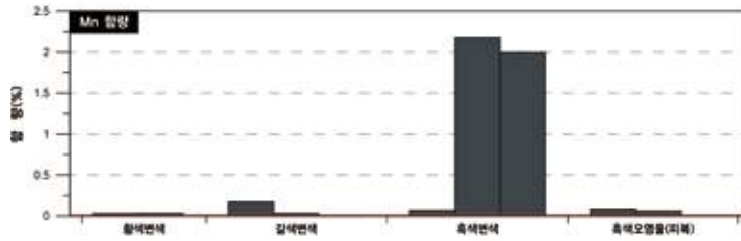
표3. 표면오염물 P-XRF 측정위치

측정번호	측정 위치	표면오염물의 종류
1	동측면 2층 탑신석	흑색오염물(피복)
2	동측면 2층 탑신석	갈색변색
3	서측면 3층 옥개석	흑색변색
4	서측면 2층 탑신석	갈색변색
5	남측면 3층 옥개석	황색변색
6	남측면 3층 옥개석	황색변색
7	남측면 기단면석	갈색변색
8	남측면 기단면석	흑색변색
9	남측면 기단면석(우주)	흑색변색
10	북측면 2층 탑신석	흑색오염물(피복)
11	북측면 1층 탑신석	흑색오염물(피복)

분석결과 피복된 형태의 오염물은 Ca와 S가 높게 나타났으며, Ca와 S를 주원소로 하는 석고에 흑색의 오염물이 침착된 것으로 판단된다<sup>(도12)</sup>.

흑색변색으로 분류한 지점에서는 Mn이 높게 검출되었다. Mn의 함량이 높은 지점은 남측 기단부에 집중되며, 망간 산화물에 의한 오염으로 볼 수 있다. S의 경우 신선부에서는 거의 관찰되지 않지만 석탑 전반에서 수% 이상의 함량을 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 환경오염으로 형성된 대기 중의 S가 물에 녹아 변색을 유발하는 오염원으로 작용하였을 것으로 해석된다.

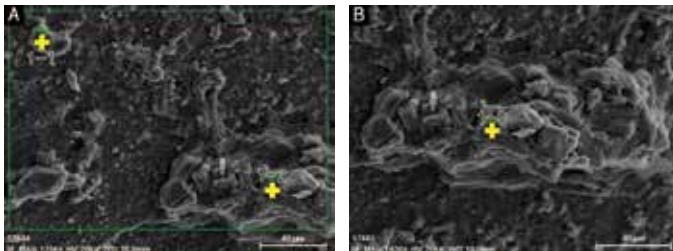




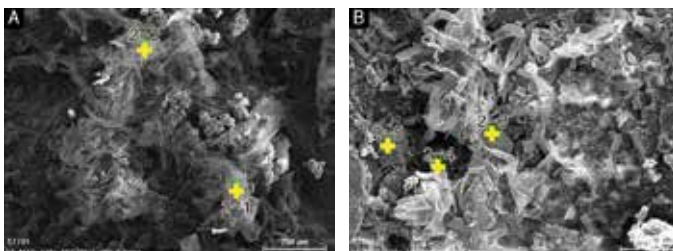
도12. 표면오염물의 종류에 따른 주요 오염원소의 함량

수습한 오염물 시료는 피복된 형태의 흑색오염물 1점과 흑색변색 1점의 시료를 수습하여 주사전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope) 관찰과 에너지 분산형 X-선 분석(EDS; Energy Dispersive Spectroscopy)을 실시하였다. 분석에는 JEOL사의 JSM-6335모델을 사용하였으며, 시료의 표면을 백금으로 코팅한 후 관찰을 수행하였다.

두 시료는 산출상태에서 명확한 차이를 보이는데, 피복된 형태의 흑색오염물은 암석의 표면에 미립의 광물결정이 산재하며, 광물의 크기는 수 $\mu\text{m}$ 부터 100 $\mu\text{m}$ 에 이르기까지 다양한 크기를 갖는다. 광물은 단결정으로 나타나지 않으며 여러 개의 광물이 복합체를 형성한 형태를 보인다<sup>(도13)</sup>. 흑색변색 시료는 암석 표면 전반에서 섬유나 끈의 형태를 갖는 이물질이 엉겨 붙어 있는 양상으로 관찰된다<sup>(도14)</sup>.



도13. 피복된 형태의 흑색피복 오염물의 SEM화상 및 EDS 측정지점



도14. 흑색변색 시료의 SEM화상 및 EDS 측정지점

흑색피복 오염물 시료의 광물 표면 전체에 대한 EDS 분석 결과, Si(10.5%)가 가장 많은 함량을 보였으며, Al(8.3%), Ca(4.8%), S(4.1%) 순서로 나타났다. 그러나 결정화된 광물을 측정된 결과, Ca와 S의 평균함량은 각각 16.1%, 11.0%이며, Si와 Al은 극미량 함유되어 있다. 따라서 피복된 형태의 흑색오염물은 표면에 결정화된 석고에 먼지나 대기오염물이 침착되어 변색된 것으로 해석할 수 있다<sup>(표4)</sup>.

흑색변색 시료의 EDS 측정 결과에서는 섬유나 끈의 형태를 갖는 이물질이 대부분 탄소로 구성되며, 유기물에 의한 오염으로 판단된다. 이러한 유기물이 피복되지 않은 2-3지점의 측정에서는 탄소의 함량이 매우 낮으며, 암석을 구성하는 Si 및 Al의 함량이 높게 나타나 대조적인 특징을 보인다. SEM 이미지와 EDS 분석을 종합하여 볼 때, 흑색변색은 곰팡이나 균류에 기인한 것으로 볼 수 있겠다.

표4. 흑색피복오염물과 흑색변색 시료의 SEM-EDS 분석결과

(성분조성 : wt.%)

측정위치		C	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S
흑색피복 오염물	전체면	10.2	10.5	8.3	0.4	4.8	2.8	0.2	1.2	4.1
	1-1	5.4	0.2	0.4	0.0	15.8	0.0	0.0	0.0	12.3
	1-2	7.4	0.0	0.3	0.0	14.4	0.0	0.0	0.0	12.6
	1-3	2.1	3.5	2.2	1.3	18.0	0.0	1.6	0.0	8.2
흑색변색	2-1	88.3	0.7	1.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.0	0.2
	2-2	85.6	2.1	1.6	0.3	0.2	0.0	0.4	0.0	0.3
	2-3	0.0	21.1	9.9	0.0	0.9	6.5	0.2	0.0	0.0
	2-4	77.0	5.0	2.4	0.0	0.1	1.1	0.2	0.0	0.0
	2-5	69.0	6.3	3.5	0.0	0.1	1.6	0.4	0.0	0.0

## 5. 보존처리

### 5.1. 몰탈제거 및 세척

보존처리를 안전하게 수행할 수 있도록 가설구조물과 외부 가림막을 설치하였다. 낙성대 삼층석탑에는 과거 석탑을 보수하며 사용한 시멘트 몰탈이 부재 사이 여러 곳에 남아 있다. 이 몰탈은 이미 접착 기능이 저하되어 있으며, 백화 등 이차적인 오염을 야기할 수 있으므로 제거를 실시하였다. 석탑 3층 옥개석 상부면에 가장 많은 몰탈이 덮혀 있었고 부재와 부재 사이 연결 부위에 위치한 상태였다. 시멘트 몰탈의 제거를 위해 샘플테스트를 실시하여 처리방법과 강도, 범위를 설정하였고 그 결과 소도구를 이용하여 물리적인 방법으로 제거를 진행하였다. 몰탈 제거 작업 시에 석탑표면이 박락되지 않도록 몰탈이 강하게 접착되어 있는 곳은 제거 대상에서 제외하여 석탑 표면의 손상을 최소화 하였으며, 석탑의 미관을 해치는 몰탈

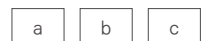
오염물은 최대한 주의하여 제거하였다. 메스, 치과용소도구, 정과 망치를 이용하여 조금씩 제거하고 붓을 이용하여 제거 부위를 확인하면서 단계적으로 작업을 진행하였다(도15).



(a) 가설구조물 및 외부  
가림막 설치  
(b, c) 몰탈 제거

도15. 가설구조물 설치 및 몰탈 제거

낙성대 삼층석탑 표면은 흑화피복 오염물, 흑색변색, 갈색변색 및 지의류와 이끼류, 먼지 등 다양한 오염물이 존재하고 있다. 지의류, 이끼류 및 균류에 의한 흑색변색에 대해서 건식세척과 습식세척을 병행하여 실시하였다. 건식세척은 대나무칼, 메스, 치과용소도구 등을 이용하여 지의류와 이끼류를 1차적으로 제거하였다. 습식세척은 균류에 의한 흑색변색과 분진 등 이물질 제거하기 위하여 실시하였고, 증류수를 충분히 분무하여 표면이 습윤한 상태에서 부드러운 솔을 이용하였다(도16). 세척 작업은 오염물을 최대한 제거하되 석재 표면이 손상되지 않는 선에서 마무리하였다.



(a) 샘플테스트  
(b) 건식세척  
(c) 습식세척

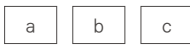
도16. 세척 과정

## 5.2. 흑화피복 오염부 미세블라스팅

습식세척으로 제거되지 않는 흑화피복 무기오염물은 기계적인 방법인 미세블라스팅을 이용하여 제거하였다. 미세블라스팅은 건식 일반 블라스팅과 같은 원리이나 매우 미세한 마모분말을 사용하는 부드러운 세척 방법으로 석조물의 오염부를 섬세하게 처리하기 위하여 선정하였다. 사용 분말은 석영의 경도보다 낮은 백운석을 사

용하였다<sup>(도17)</sup>.

안정한 처리를 위해 사전 샘플테스트를 통하여 흑화 및 철산화물 제거의 효과를 확인하고, 처리 범위와 강도 등을 설정 한 뒤 작업을 진행하였다. 샘플테스트는 자문 회의 검토 의견을 반영하여 산성계열의 약품은 제외하고 증류수, 알코올, 아세톤, 건식세척 소도구 및 미세블라스팅을 적용하였다. 샘플테스트 결과, 미세블라스팅 방법으로 석재 표면의 손상 없이 오염물이 제거되는 효과를 확인하였다. 미세블라스팅은 3~5bar 압력과 투사거리 30cm를 기준으로 강도와 거리를 조절하였다. 또한 오염물 제거 시 과도하게 세척되어 주변부와 이질감이 발생하지 않도록 주의를 기울이며 진행하였다.



(a) 샘플테스트

(b, c) 미세블라스팅



도17. 세척 과정

낙성대 삼층석탑 뿐만 아니라 서울지역의 석조문화재는 도심에 위치하여 산성비와 대기오염으로 짧은 기간 동안 집중적으로 풍화와 훼손이 가중되고 있다<sup>(도18)</sup>. 대기오염이 상대적으로 가중한 도심의 환경적인 요인은 무기오염물의 피복에 의한 표면오염으로 타 지역과 차별되는 독특한 양상이 나타난다<sup>[11~12]</sup>. 또한 서울 도심에 위치하는 석조문화재는 다른 지역에서 주요하게 발생하는 고착지의류의 모습이 매우 드물게 나타나는 경향을 보이기도 한다.

서울지역의 흑화피복 오염물은 암석을 구성하는 광물입자에 매우 강하게 착색되어 있어 일반적인 건식 및 습식세척 방법으로는 제거되지 않는다. 따라서 암석의 표면을 침식하고 풍화시키는 무기오염물을 제거하기 위해서는 기계적인 방법이 적용되어야 한다. 최근 활용중인 미세블라스팅 방법의 오염물 제거는 일반적인 산업용 블라스팅을 석조문화재에 응용한 것으로서 유럽에서 그 사례들이 있으며, 국내에서도 안정성 실험과 적용성 연구가 진행된 바 있다<sup>[13]</sup>.





(a, b) 환구단 기반 처리 전-후  
(c, d) 약사사 삼층석탑 처리 전-후

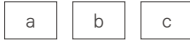
도18. 서울지역 석조문화재 흑화피복 오염물 보존처리 사례

### 5.3. 수지처리 및 암석강화처리

낙성대 삼층석탑은 주로 지대석과 면석이 경계하는 이음부와 남측 면석의 기존 부재와 신부재 사이가 몰탈로 채워 있었다. 소도구를 이용하여 물리적인 방법으로 몰탈을 제거한 후 자연스럽게 부재와 어울릴 수 있도록 수지처리를 실시하였다.

박리부위와 미세균열부의 수지처리는 에폭시 수지(L-30) 원액을 주입하여 보강하였으며, 몰탈제거 부위는 에폭시수지와 혼합제 및 동종의 석분을 입자별로 혼합하여 충전 및 보강하였다. 충진을 완료한 후 주변 석질의 입자를 고려하여 석분으로 마감하여 질감을 표현하였으며, 주변부와 이질감이 없도록 자연스럽게 처리하였다<sup>(도19)</sup>.

낙성대 삼층석탑을 구성하는 암석의 약화된 표면 물성 강화를 위해 에틸실리케이 트계 강화제(Wacker사 Silres BS OH-100)를 2차에 걸쳐 분무하였다. 1차 분무는 세척 및 미세블라스팅 작업을 완료한 후 석탑 표면이 완전히 건조된 상태에서 실시하였다. 2차 처리는 수지처리 작업이 완료된 후 1차 도포 후 약품이 충분히 흡수되도록 7일이 경과한 뒤에 2차 강화처리 하였다. 건조한 상태에서 기온이 15℃ 이상인 환경 하에서 암석강화처리를 실시하였다.



- (a) 박리부 수지주입  
(b) 균열부 수지처리  
(c) 암석강화처리



도19. 수지처리 및 암석강화처리

## 6. 결론 및 고찰

낙성대 삼층석탑은 고려 중기 이후 탑의 변천과정을 알 수 있는 자료로 그 가치가 크다 하겠다. 하지만 외부환경에 지속적으로 노출되어 풍화가 상당히 진행되었고, 기존 보수 몰탈은 기능을 상실하고 미관을 저해하고 있었다. 또한 생물오염과 함께 대기오염에 의한 변색과 흑화 피복 오염으로 훼손이 가중되고 있는 상태였다.

이번 낙성대 삼층석탑 보존처리에서는 기존 몰탈 제거 및 세척, 흑화피복 오염부 미세블라스팅, 균열부 수지처리 및 암석강화처리를 실시하였다. 기존 보수 시 과도하게 충전된 몰탈은 기능이 상실된 부위를 소도구를 이용하여 제거하였으며, 부재 사이의 공극을 채우는 구조적인 측면을 감안하여 무리하지 않는 범위 내에서 처리하였다.

몰탈을 제거한 부위는 동종의 석분으로 표면 마감 처리를 하여 이질감을 최소화하였다. 석탑에 발생하고 있는 균열부에 대해서는 합성수지 충전 및 보강으로 기계적인 균열의 확장을 저지시키고 수분 유입에 의한 물리적인 풍화를 방지하였다. 또한 전체적으로 약화된 석질의 표면을 회복시키기 위해 에틸실리케이트계 강화제를 2차에 걸쳐 분무처리를 실시하였다<sup>(도20)</sup>.



a	b
c	d
e	f

(a, c, e) 처리 전  
(b, d, f) 처리 후



도20. 낙성대 삼층석탑 보존처리 전-후

이번 보존처리를 통해 석탑의 변색과 오염물을 제거하였지만, 도심에 위치하여 대기오염에 취약한 환경적 요인과 탑신과 옥개석 사이 공극에서 철산화물에 의한 오염이 재발생할 것으로 예상된다. 따라서 석탑의 지속적인 모니터링과 사후 관리가 중요하겠다.

한편, 낙성대 삼층석탑은 오랜 시간을 거치면서 안정화 되어 있으나 1, 2층 옥개석과 탑신석 사이의 이격부위로 인해 구조적 안정성과 지반의 상태를 점검할 수 있는 계측모니터링이 수반되어야 할 것으로 본다.

## 참고문헌

1. 김수진, 이민성, 김원사, 이수재, 서울 지역의 자연환경 변화에 관한 연구 : 남산 화강암의 풍화에 관한 환경광물학적 연구, *지질학회지* **30**, p284-296, (1994).
2. 김지영, *한국 석빙고의 손상메커니즘 해석과 보존환경 평가*, 공주대학교 대학원 문화재보존과학과, 박사학위논문, p271-278, (2009).
3. 이명성, *경주 불국사 및 감은사지 석탑의 재질특성과 보존과학적 손상평가*, 공주대학교 대학원 문화재보존과학과, 박사학위논문, p55-75, (2007).
4. 전유근, *한국 석조문화재의 표면풍화 메커니즘 평가 해석 및 평가시스템 구축*, 공주대학교 대학원 문화재보존과학과, 박사학위논문, p126-174, (2012).
5. 조영훈, 이찬희, 석조문화유산의 손상지도 제작방법과 표면 및 3차원 손상을 평가기법, *보존과학회지* **27**, p251-260, (2011).
6. Fitzner, B. and Heinrichs, K., *Damage diagnosis on stone monuments-weathering ofrms*, damage categories and damage indices, Understanding and managing stone decay, Progue, The Karolinum Press, p11-56, (2002).
7. Ishihara, S., The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks, *Mining Geology* **27**, p293-305, (1977).
8. 김사덕, 이정은, 이동식, 이찬희, 익산 미륵사지석탑 복원을 위한 대체석의 동질성 검토, *보존과학회지* **27**, p211-222, (2011).
9. 이찬희, 김무연, 조영훈, 이명성, 중원탑평리칠층석탑의 재질특성과 산지추정 및 손상도 진단을 통한 보존처리, *문화재* **43**, p4-25, (2010).
10. 이찬희, 김영택, 이명성, 부여 정림사지 오층석탑 구성암석의 원산지 추정, *지질학회지* **43**, p183-196, (2007).
11. 도진영, 김정진, 조현구, 도심지역에 위치한 탄산염암 석탑 표면에 형성된 흑색층의 특성과 기원, *한국광물학회지* **19**, p383-392, (2006).
12. 김영택, *경복궁 근정전 권역 석조문화재의 보존과학적 손상도 및 진단 연구*, 공주대학교 대학원 문화재보존과학과, 박사학위논문, p142-148, (2018).
13. 이연경, *익산 미륵사지 석탑 원부재의 표면 블라스팅 세정기법 연구*, 공주대학교 대학원 문화재보존과학과, 석사학위논문, p43-83, (2016).