

# 경주 분황사 모전석탑의 암석학적 풍화와 보존과학적 훼손도 진단

이정은 · 이찬희 · 이명성 · 김영택  
공주대학교 문화재보존과학과

## Weathering and Deterioration Diagnosis for Conservation Sciences of Stone Pagoda in the Bunhwangsa Temple, Gyeongju, Korea

Jeong-Eun Yi, Chan-Hee Lee, Myeong-Seong Lee and Young-Taek Kim  
*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University*

### Abstract

The host rocks of brick-shaped stone pagoda in the Bunhwangsa temple are lots of kinds andesitic rocks, which has gone through mechanical and chemical weathering. As the overall observation, the pagoda is serious damages by air pollutants, and the northeast parts show the much advanced state of turning white, while the southeast parts are heavily cracked in the materials. The rocks of brick-shaped pagoda body are in a relatively stable condition of weathering and damage except for the abrasion and cracks of the corners. The rocks of the pagoda roof suffer from more symptoms including multiple peel-offs, exfoliation, cracks forming round lines, and falling off stone pieces. The pagoda roof rocks are dominated by the thriving leafy lichens and mosses, especially, there are higher plants (selaginella involvens, dandelions) taking root actively between the brick stones and cement mortar. There are even light gray precipitates like stalactites between the rocks of the body, in particular, the 1st and 2nd floor in the east side and the body parts in the north side are

the most serious. Their major minerals are calcite, gypsum and clay minerals. The rocks of the stylobate and the tabernacle in all the four directions are composed mainly of granitic rocks. The materials consisting of the tabernacles show the severe splits and distortion, which causes the structural instability. The stylobate rocks are heavily contaminated by some weeds with the often marks of inorganic contamination by secondary hydroxides. The central part of the east stylobate has been sinking, while that of the 1st floor west stylobate is protruded nesting a line of cracks. Accordingly, the inside of the tabernacle is always humid with the constant introduction of rainwater. The stone lion standing in the southeast and northeast side are alkali granite, while that in the southwest and northwest lithic tuff. Each of the stone lion also covered with various colored lichens, mosses, algae, bacteria and bryophyte. The external materials of the pagoda have deteriorated the functions of the rocks and made the loss, falling off, and biological contamination even worse due to the surface weathering. Thus it's urgent to come up with scientific restoration and conservation measures through clinical tests.

## 1. 서 언

분황사 모전석탑은 행정구역상 경북 경주시 구황동 313 분황사 경내에 있다. 현재 남아있는 신라 석탑 가운데 가장 오래된 것으로, 암석을 벽돌 모양으로 다듬어 쌓아올린 모전석탑이다. 원래 9층이었다는 기록이 있으나 지금은 3층만 남아있다. 이 탑은 넓은 1단의 기단 위에 3층의 탑신을 쌓아올린 모습이다. 기단은 화강암질 암석으로 이루어져 있고, 네 모퉁이마다 암석으로 조각된 석수가 한 마리씩 앉아 있다. 암회색 안산암을 작게 벽돌모양으로 잘라 쌓아올린 탑신은 거대한 1층 몸돌에 비해 2층부터는 현저하게 줄어드는 모습을 보이고 있다(Fig. 1A).

1층 탑신에는 네 면마다 문을 만들고, 양쪽에 불교의 법을 수호하는 인왕상을 조각해 놓았다. 옥개석은 아래 윗면 모두 계단 모양의 층을 이루고 있는데, 3층 옥개석만 윗면이 네 모서리에서 위쪽으로 둥글게 솟은 모양이며, 그 위로 석영반암으로 만든 연꽃장식이 놓여 있다. 이 탑은 1915년 일본인에 의

해 수리된 이후 지금까지 그 모습을 유지하고 있으며, 수리 당시 탑 안에서 사리함과 구슬 등의 많은 유물들이 발견되었다.

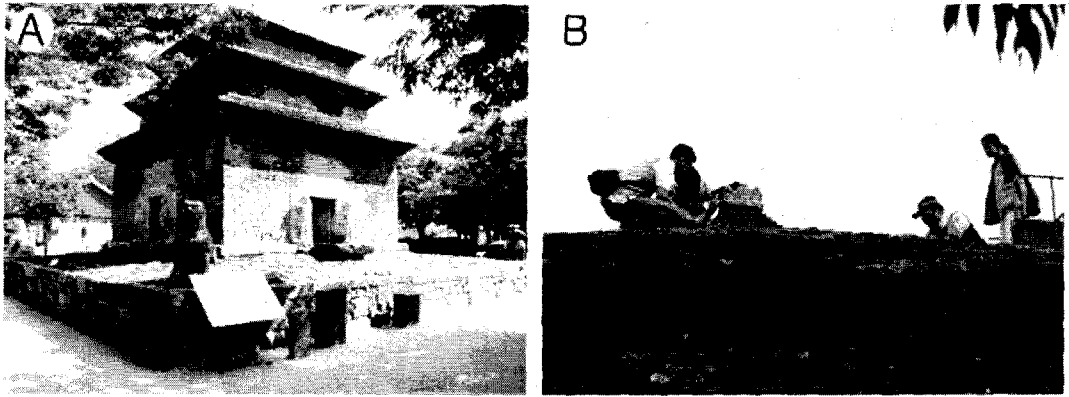


Fig. 1. Southeastern view of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple (A). The rocks materials are composed of brick-shaped andesitic rocks. Photograph B shows detail survey in the uppermost roof of 3rd floor.

이 탑에 대한 역사학적, 고고학적 및 미술사학적인 연구는 많이 있으나 암석의 종류와 지질학적 구조안정성, 암석학적 풍화와 훼손 및 보존방안에 대한 연구는 극히 미진하다. 따라서 분황사 모전석탑을 구성하고 있는 안산암과 화강암류 및 기타 혼용된 암석을 대상으로 암석학적 특성, 풍화양상 및 훼손도를 상세히 연구하였다(Fig. 1B). 이 결과를 기초로 분황사 모전석탑을 이루고 있는 재질의 물리적 및 화학적 변화와 생물학적 영향에 따른 정량적인 풍화훼손도를 평가하였으며, 보존을 위한 과학적 방안을 도출하였다. 또한 이를 정량화하여 이와 유사한 석조문화재의 보존연구를 위한 자료로 활용할 것이다.

## 2. 현황 및 사이트 환경

경주 분황사 모전석탑은 전체적으로 대기 오염물질(먼지)의 피해가 심하며 북동쪽은 백화현상이 남서쪽은 부재의 균열이 심각하다. 이 탑은 여러 종류의 암석으로 이루어져 있으며 부재의 종류와 위치에 따라 풍화상태의 정도가 다르다. 전반적인 사이트 환경은 양호하나 특별한 보호시설이 없어 관광객들의 접촉이 우려되며, 먼지를 유발하는 경내의 환경도 석탑의 풍화를 촉진시킬 것으로 판단된다.

분황사 입구에 있는 나무는 탑의 일조량을 방해하며 낙엽 등에 의한 오염을 유발할 수 있다. 또한 기단부와 지대석에는 지의류를 비롯한 각종 미생물 및 하등식물의 천이가 진행되어 있는 상태이며 탑신과 옥개석에는 엽상 지의류와 고등식물의 식생이 왕성하다. 따라서 이 탑에 영향을 줄 수 있는 생물체에 대한 대비가 있어야 할 것이다.

### 3. 부재의 암석학적 및 광물학적 특성

모전석을 이루는 암석은 안산암질암으로서 암갈색, 적자색, 청회색, 암녹색, 암흑색, 암회색 등을 보이거나 암회색을 보이는 암석이 가장 많다(Fig. 2A). 암석의 종류로는 비현정질 괴상안산암, 반정질 안산암이 우세하며 안산암질 회류 응회암, 안산암질 암편 응회암, 안산암질 각력 응회암, 안산암질 용결 응회암 등과 같은 응회암류들이 혼재한다. 또한 현무암질암, 조립질 안산암도 관찰된다. 거의 모든 탑신부에는 전석사이에 충전된 콘크리트가 물에 녹으면서 생성된 회백색 침전물이 백화현상을 야기하고 있다(Fig. 2B).

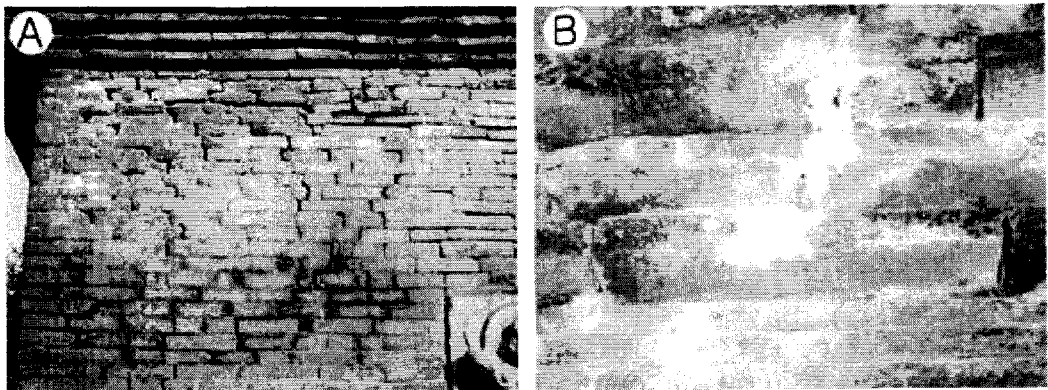


Fig. 2. The brick-shaped rock materials are highly deterioration along the coner, surface discoloring and leakage of rain water along the fracture systems (A). The stalactite-like white grey precipitates formed boundary between the rock materials.

기단부와 동서남북 방향의 감실 및 인왕상을 이루고 있는 암석은 주로 화강암질암이다. 암석의 종류는 알카리 화강암, 우백질 화강암, 흑운모 화강암, 홍장석 화강암, 반화강암, 미문상 화강암, 화강섬록암, 셰일, 암산암질암, 응회암이 혼재한다. 이 중에서 우점종을 이루고는 암석은 알카리 화강암, 흑운모

화강암 및 홍장석 화강암이다. 동남쪽 석수와 동북쪽 석수는 알칼리 화강암이며, 서남쪽 및 서북쪽 석수는 암편질 응회암이다.

이 석탑의 전석인 안산암질 응회암과 기반부의 알칼리 화강암을 박편으로 제작하여 편광현미경 관찰을 하였다. 이 결과, Fig. 3A와 같이 전형적인 세립질의 안산암질 응회암의 기질과 반정질 사장석 및 흑운모가 주요 조암광물을 이루고 있음을 알 수 있다. 기반부를 이루고 있는 대표적인 암석인 알칼리 화강암을 편광현미경에서 관찰하며 주로 등립질 입상조직을 갖는 석영과 퍼사이트화된 알칼리 장석 및 흑운모가 주류를 이룬다(Fig. 3B). 이 중에 알칼리 장석은 견운모화 되어 있으며 흑운모는 경계나 벽개면을 따라 녹니석화되어 있다.

#### 4. 보존과학적 풍화훼손도 진단

분황사 모전석탑의 탑신을 구성하는 안산암질암은 부분적으로 모서리 마모와 균열이 발생되어 있으며(Fig. 2A), 풍화와 훼손에는 비교적 안정한 상태로 판단된다. 그러나 옥개의 전석은 박리와 박락, 구열상 균열 및 암편상 탈락이 진행 중이다. 이 기반부의 암석은 기생 생물에 의한 피복 오염이 심하며, 부분적으로 암흑색 및 황갈색 이차 수화물에 의한 무기오염물도 관찰된다. 또한 모서리 마모와 탈락 및 입상분해 작용이 진행 중이며, 부분적으로 박리와 박락 및 균열이 발생되어 있다.

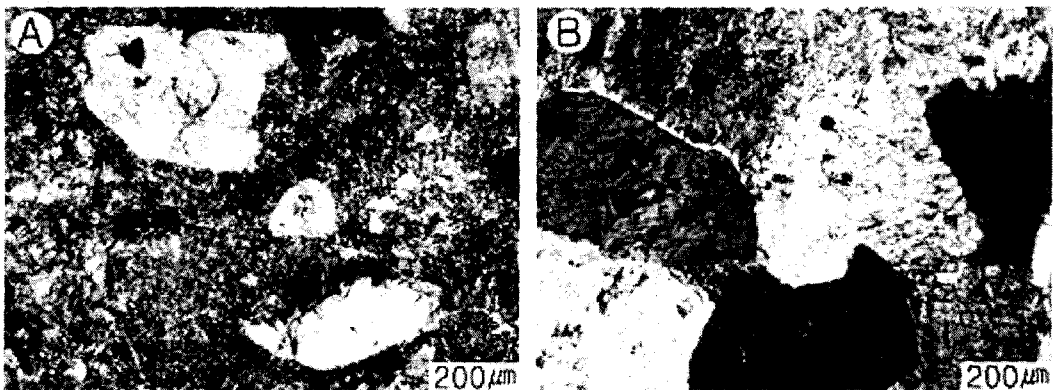


Fig. 3. Microphotographs showing weathered host rocks of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (A) Andesitic tuff composed of tuffaceous groundmass, rock fragment and subhedral plagioclase. (B) Quartz, feldspar and biotite assemblages of alkali granite. Alkali feldspar and biotite are changed into clay minerals and chlorite along the grain boundaries, respectively.

동쪽 감실문은 균열이 발생되어 있으며, 인왕상 두상의 파괴와 하단부의 암갈색 및 황갈색 변색이 관찰된다. 또한 동쪽 인왕상의 반침석은 일부 멸실과 박리 및 박락이 심각하다. 서쪽 감실의 훼손과 풍화도는 비교적 낮으나 상부가 불룩하게 나와 있으며 이와 접하는 탑신의 전석에 균열과 박락이 수반되었다. 북쪽 감실은 비정질 철수산화물의 오염이 생성되어 있다. 석수는 표면 풍화가 심각하게 진행되어 있으며, 동남쪽 석수의 다리 부분은 수지로 접합된 흔적이 있고, 동북쪽 석수의 다리는 신부와 분리되었다. 풍화는 화강암보다 응회암으로 이루어진 석수에서 심각하다.

이 석탑의 옥개 낙수면을 이루는 전석에는 엽상 지의류, 이끼류 및 초본 식물들의 침입이 있다. 특히 전석 사이를 충전한 시멘트 접착물질과의 경계부에서 초본식물들의 활착이 왕성하다. 또한 부재의 곳곳에는 거미와 개미집이 산재하며, 먼지와 같은 대기 오염물질들의 피복도 심각하다. 기단부의 암석도 지의류와 선태류에 의한 피복 오염이 심하며 낙수면의 콘크리트와 석재를 충전한 곳에서는 고등식물의 침입과 선태류가 밀생한다.

이 탑에서 지의류에 의한 풍화가 가장 심한 곳은 석수 부분으로 각각의 석수에는 공통적으로 고착 지의류, 엽상 지의류, 선태류, 조류 및 균류의 오염이 심하다. 주변 탑재에는 초본 식물 역시 성장하고 있어 피해가 우려된다. 이 석탑을 이루는 부재를 주사전자현미경(SEM)으로 보면, Fig. 4A와 같이 조암광물의 공극에서는 2~3  $\mu\text{m}$  정도의 두께를 갖는 지의류의 균사와 초본식물의 뿌리 조직이 이차적으로 생성된 점토광물과 결합되어 있는 등 석재내부의 풍화 현상도 관찰할 수 있다.

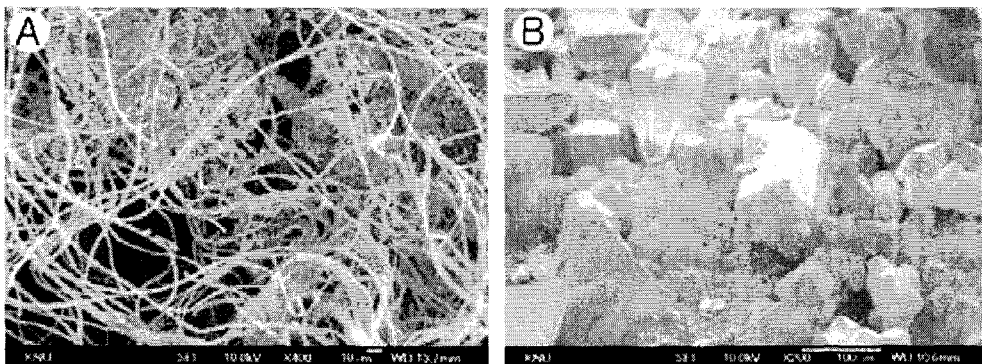


Fig. 4. Scanning electron microphotographs (SEM) showing organic and secondary materials of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. (A) Fibrous rootlets and fungus of lichen grown into the near surface of the rock material. (B) Euhedral calcite and gypsum in the white grey precipitates formed rock surface.

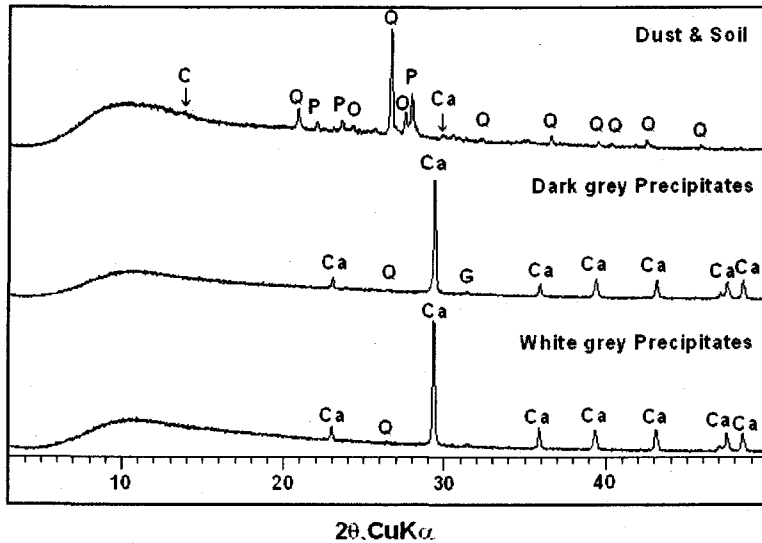


Fig. 5. X-ray powder diffraction patterns of secondary materials of the stone pagoda in the Bunhwangsa temple. C; chlorite, Q; quartz, P; plagioclase, O; orthoclase, Ca; calcite, G; gypsum.

이 탑의 전석사이에서는 회백색 침전물질이 종유석과 같이 생성되어 있다 (Fig. 2B). 이는 염산반응 정도로 보아 방해석이 주성분 광물로 보이며, 석고 및 수화석으로 보이는 다른 백색 침전물과 공생한다. 이외에도 피각상을 이루는 백색 침전물이 있으나 이는 암석의 풍화작용에 의해 생성된 점토광물로 판단된다. 이 침전물들은 관람객이 생성시키는 먼지와 함께 부착되어 있는 경우도 있다. 이 침전물을 색도에 따라 세분하여 X-선 회절분석을 실시하였다 (Fig. 5). 분석결과, 색의 차이에 관계없이 주로 방해석으로 구성되어 있으며 미량의 석고가 검출되었다. 이는 Fig. 4B의 전자현미경 사진에서도 확인할 수 있다.

한편 이 탑에는 크고 작은 균열이 발생되어 있다. 특히 서쪽 1층 탑신부의 중앙은 볼록하게 튀어나와 있으며 이를 따라 균열대가 형성되어 있다. 북쪽 감실은 상단부가 돌출되어 있어 안정감을 해치고 있다. 남동쪽 1층 탑신의 상단부에는 강수의 흔적이 나타나 있으며, 같은 방향의 감실 내부는 이로 인해 습기가 심하며 암석이 함수되어 있고 약취도 심하다. 이러한 강수의 흔적은 Fig. 2A에서도 보이는데, 계속되는 누수 현상은 암석의 풍화를 촉진시킬 수 있다. 또한 이 석탑에는 대기 오염물질(먼지)의 피해로 인해 암석의 표면에 토양이 산재한다. 이러한 토양은 생물들의 천이를 발생시키는 영양분의 역할을

하고 있으며, 암석의 성분과 결합하여 부재 표면에 다양한 형태의 산화물을 형성하고 있다.

## 5. 결 언

1. 이 탐의 부재는 여러 암석이 혼용되었으며 전체적으로 보아 대기 오염물질(먼지)의 피해가 심하다. 탐의 북동쪽은 백화현상이 남서쪽은 부재의 균열이 심각하다. 이 탐의 전반적인 사이트 환경은 양호하나 보호시설이 없어 관광객의 영향을 직접적으로 받는다.

2. 모전석을 이루는 암석은 주로 안산암질암이나 아주 다양한 성인을 갖는다. 탐신과 옥개를 이루고 있는 전석은 부분적으로 모서리 마모와 균열이 발생된 것을 제외하며 비교적 풍화와 훼손에 안정한 상태로 보인다. 그러나 옥개의 전석은 다중박리와 박락, 양과깍질과 같은 분해 및 구열상 균열 및 암편상 탈락이 진행 중이다.

3. 탐신의 전석은 부분적으로 지의류와 이끼류의 침입이 있었으나 전반적으로 양호하다. 그러나 옥개를 이루고 있는 암석은 엽상지의류, 이끼류 및 고등식물의 침입이 왕성하다. 특히 전석 사이를 충전한 시멘트 접착물질과의 경계부에서 고등식물(바위손, 민들레 등등)의 활착이 심각한 상태이다. 식물의 침입은 상대적으로 북서쪽이 심하며 솔이끼와 같은 식물은 주로 북서쪽에서 밀생한다. 또한 부재의 곳곳에는 거미와 개미집도 산재한다.

4. 탐신의 전석사이에서는 회백색 침전물질이 종유석과 같이 생성되어 있다. 여기에는 방해석이 주성분 광물이며 석고와 점토광물이 포함되어 있다. 이 백색침전물의 분포는 북동쪽에 우세하게 발생되어 있으며 특히 동쪽 1층과 2층의 탐신부 및 북쪽의 탐신부가 가장 심하다. 이 침전물들은 관람객이 생성시키는 먼지와 함께 부착되어 있다.

5. 기단부와 동서남북 방향의 감실 및 인왕상을 이루고 있는 암석은 주로 화강암질암이다. 기단부의 암석은 지의류와 이끼류에 의한 피복오염이 심하며 부분적으로 암흑색 및 황갈색 이차 수화물에 의한 무기오염물도 관찰된다. 특히 기단부 낙수면의 콘크리트와 석재를 충전한 곳에서는 고등식물 등의 침입이 심각하다.

6. 동쪽 기단부의 중앙은 중심침하를 하고 있으며, 서쪽 1층 탐신부의 중앙은 불룩하게 튀어나와 있어 이를 따라 균열대가 형성되어 있다. 따라서 감실



내부는 우수의 침입에 의해 항상 습한 상태이다. 또한 기반부를 이루는 암석은 모서리 마모와 탈락 및 입상 분해작용이 진행 중이며, 박리와 박락 및 균열이 발생된 부분도 있다.

7. 동남쪽 석수와 동북쪽 석수는 알카리 화강암이며, 서남쪽 및 서북쪽 석수는 암편질 응회암이다. 각각의 석수에는 거의 공통적으로 지의류(암흑색, 담록색, 회백색), 엽상지의류, 이끼류(술이끼), 조류 및 균류(황갈색), 선대류의 오염이 심하며 주변의 탐재에는 고등식물이 성장하고 있다.

8. 이 석탑은 표면풍화에 의한 석재의 기능저하와 부재의 결실, 탈락, 생물오염 등이 심각하므로 임상실험을 통한 과학적 보존수복이 필요하다. 또한 감실을 이루고 있는 부재들은 이격과 왜곡이 심하며 구조적으로 불안정함을 보인다. 따라서 정밀진단을 통한 종합적 보존방안의 수립이 필요하다.