

경주 분황사 석탑의 훼손도 평가와 부착생물종의 다양성

이정은* · 이찬희* · 김광훈** · Tatiana A. Klotchkova**

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 생명과학과

Deterioration Assessment and Diversity of Epilithic Biospecies for Stone Pagoda in the Bunhwangsa Temple, Gyeongju, Korea

Jeong Eun Yi*, Chan Hee Lee*, Gwang Hoon Kim**
and Tatiana A. Klotchkova**

**Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University,
Kongju 314-701, Korea*

***Department of Life Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea*

1. 서 언

분황사 석탑은 경북 경주시 구황동 313 분황사 경내에 있으며, 현재 남아있는 신라 석탑 가운데 가장 오래된 탑이다. 탑의 형식은 암석을 벽돌 모양으로 다듬어 쌓아올린 모전석탑으로 원래 9층이었다는 기록이 있으나 지금은 3층만 남아있다. 이 탑에 대한 역사학적, 고고학적 및 미술사학적인 연구는 많이 있으나 암석의 종류와 지질학적 구조안정성, 생물학적 풍화와 훼손 및 보존방안에 대한 연구는 극히 미진하다.

이 연구에서는 분황사 석탑을 구성하고 있는 안산암과 화강암류 및 기타 혼용된 석재를 대상으로 암석학적 특성, 풍화양상 및 훼손도를 상세히 규명하였으며, 부착 생물종에 대한 정밀 동정을 수행하여 침해생물의 다양성을 살펴보았다. 이 결과를 기초로 분황사 석탑을 이루고 있는 재질의 정량적 풍화훼손도를 평가하였으며, 보존을 위한 과학적 방안을 도출하였다. 또한 생물학적 훼손을 진단하여 저감방안을 제시하였다. 이는 석조문화재의 종합적 보존방안을 마련하는데 기여할 것이다.

2. 현황 및 연구방법

분황사 석탑은 전체적으로 대기 오염물질의 피해가 심하며 북동쪽은 백화현상이 남서쪽은 부재의 균열이 심각하다. 이 탑은 여러 종류의 암석으로 이루어져 있으며 부재의 종류와 위치에 따라 풍화상태의 정도가 다르다. 석탑의 주위에 분포하고 있는 수목들은 탑의 일조량을 방해하며 오염을 유발한다. 또한 기단부와 지대석의 지의류를 비롯한 미생물 및 하등식물의 천이가 진행되어 있는 상태이며 탑신과 옥개석 역시 고등식물의 활착이 심각하다(그림 1A).

석탑의 표면에는 방위에 관계없이 회백색 및 흑갈색 침전물이 덮여 있으며, 감실 내부는 계속된 강수의 침입으로 인한 습기와 황갈색 이차 수화물이 발생되어 있다. 또한 개축 시 발생되었을 것으로 예상되는 부재의 중심 침하와 구조적 불균형이 진행되어 있어 남쪽 벽체에는 균열과 함께 돌출되어 있다.

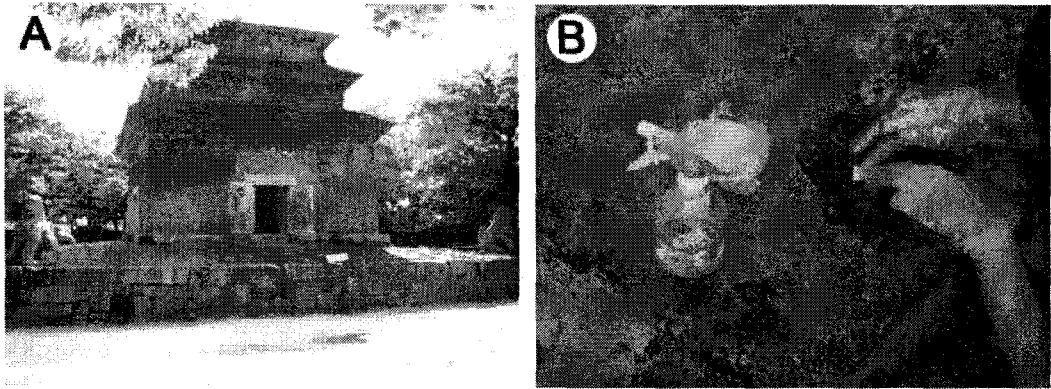


그림 1. 분황사 석탑의 동쪽면으로서 누수의 흔적과 백화현상이 관찰된다(A). 부재 표면에 피복된 조류의 동정을 위한 시료채취 과정(B).

이 연구에서는 분황사 석탑 주변의 지형 및 사이트 환경 조사와 부재의 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사를 실시하였다. 또한 분황사 석탑을 구성하는 암석을 대상으로 대자율을 측정하였고, 실내연구를 위하여 석탑 주변에 분포하는 동일한 암편을 회수하여 암석학적, 광물학적 분석용 시료로 이용하였다. 이 석탑에서 발생된 침전물 및 이차수화물의 관찰을 위해서 주사전자현미경을 사용하였으며, 암석의 반정량적인 광물조성과 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하였다. 일부 시료와 침전물에 대해서

는 X-선 회절분석을 실시하였다.

한편 석탑에 진행된 생물학적 풍화도의 진단을 위해 부착생물종의 동정을 실시하였다. 표면에 착생하는 조류나 균류 등의 미생물은 nitrocellulose membrane을 이용하여 agar plate에 바로 transfer 시킨 후 가져와 환경제어배양기에서 균주를 키우고 패치별로 분석하였다(그림 1B). 남조류 및 세균의 동정은 DIC(Differential Interferemce) 장치가 부착된 현미경으로 분석한 결과를 CAAR(Computer Assisted Algal Recognition) 프로그램에 입력하여 수행하였다. 지의류는 균류와 남조류의 공생체로서 특이한 형태를 나타내고 있어 단면을 통해 내부 구조를 관찰하고 조류와 균류의 형태와 구조 등을 연구하였다.

3. 부재의 훼손도 평가

모전석을 이루는 암석은 안산암질암으로서 암갈색, 적자색, 청회색, 암녹색, 암흑색, 암회색 등을 보이거나 암회색을 보이는 암석이 가장 많다. 암석의 종류로는 비현정질 괴상안산암, 반정질 안산암등이 있으며 현무암질암, 조립질 안산암도 관찰된다. 기단부와 동서남북 방향의 감실 및 인왕상을 이루고 있는 암석은 주로 화강암질암이다(그림 2). 암석의 종류는 알카리 화강암, 흑운모 화강암, 홍장석 화강암, 반화강암, 미문상 화강암, 화강섬록암이 혼재한다. 동남쪽 석수와 동북쪽 석수는 알카리 화강암이며, 서남쪽 및 서북쪽 석수는 암편질 응회암이다.

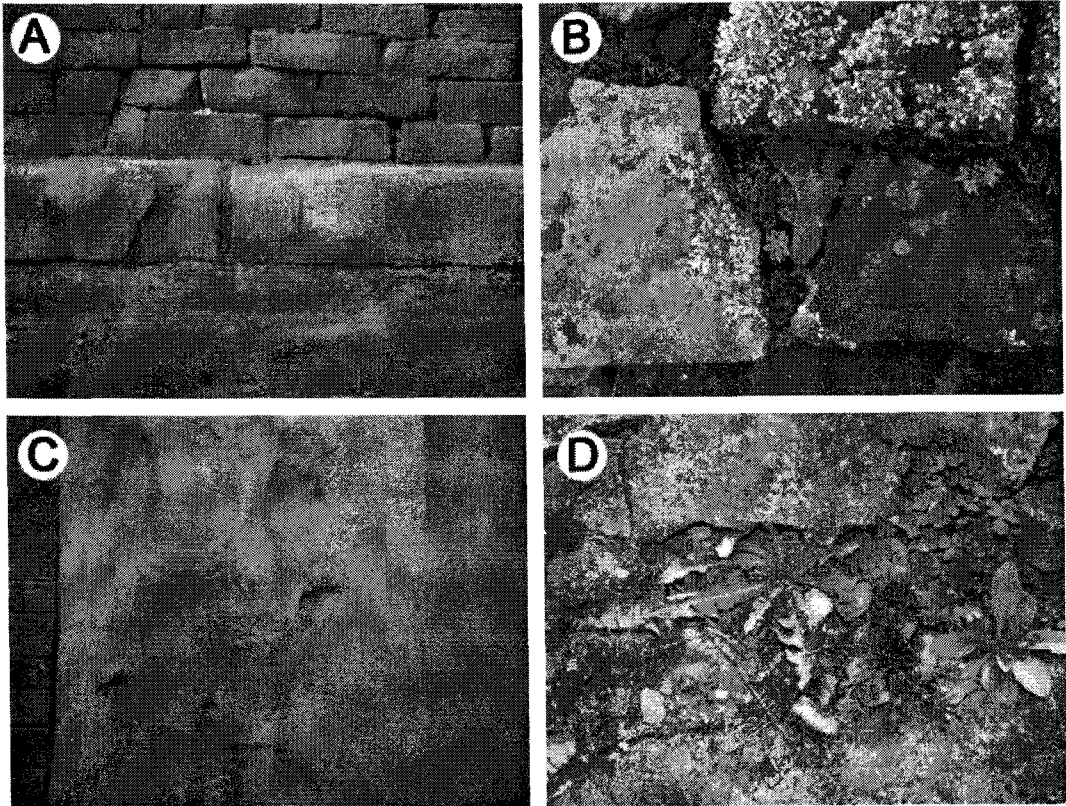


그림 2. 분황사 석탑에서 발생된 물리적, 화학적, 생물학적 풍화 상태. (A) 탑신을 이루는 암석의 표면에 발생된 박리, 박락 및 암편이 탈락된 모습. (B) 3층 옥개석의 전석에서 발생된 암편의 탈락 및 결실. (C) 감실의 인왕상에 착생 중인 조류의 모습. (D) 콘크리트로 보수된 기단 낙수면에 발생된 선태류 및 초본식물로 인한 생물피해.

분황사 석탑의 탑신을 구성하는 안산암질암은 부분적으로 모서리 마모와 균열이 발생되어 있으며, 풍화와 훼손에는 비교적 안정한 상태로 판단된다. 그러나 옥개의 전석은 박리와 박락, 구열상 균열 및 암편상 탈락이 진행 중이다. 또한 모서리 마모와 탈락 및 입상분해 작용이 진행 중이며, 부분적으로 박리와 박락 및 균열이 발생되어 있다(그림 2B).

동쪽 감실문은 균열이 발생되어 있으며, 인왕상 두상의 파괴와 하단부의 암갈색 및 황갈색 변색이 관찰된다(그림 2C). 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(그림 2A). 북쪽 감실은 비정질 철수산화물의 오염이 생성되어 있

다. 석수는 표면풍화가 심각하게 진행되어 있으며, 화강암보다 응회암으로 이루어진 석수에서 심각하다.

이 탑의 전석사이에서는 회백색 침전물질이 종유석과 같이 생성되어 있다. 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 침전물을 색도에 따라 세분하여 X-선 회절분석을 실시한 결과, 색의 차이에 관계없이 주로 방해석으로 구성되어 있으며 미량의 석고가 검출되었다.

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 악취도 심하다. 이러한 강수로 인한 계속된 누수 현상은 암석의 풍화를 촉진시킬 수 있다.

종합적으로 볼 때, 이 탑을 구성하는 총 부재의 수는 9708개로 균열이 발생한 부재는 1071개, 탈락이 발생한 부재는 652개, 백화현상이 발생한 부재는 674개이다. 이 결과를 전체 표면 부재수의 점유율을 %로 나타내면 균열은 11.0 %, 탈락은 5.7 %, 백화현상 7.0 %로 풍화로 인한 훼손 상태를 알 수 있다.

4. 부착생물종의 다양성

이 석탑의 옥개 낙수면을 이루는 전석에는 엽상 지의류, 이끼류 및 초본 식물들의 침입이 있다. 특히 전석 사이를 충전한 시멘트 접착물질과의 경계부에서 초본식물들의 활착이 왕성하다(그림 2D). 기단부의 암석도 지의류와 선대류에 의한 피복 오염이 심하며 기단 윗면의 콘크리트와 석재를 충전한 곳에서는 고등식물과 선대류가 밀생한다.

분황사 석탑의 표면에는 균류, 조류, 지의류, 선대류 및 고등식물의 성장이 왕성하다. 이러한 생물종들은 천이 과정을 통해서 변화해 나가는데, 유황 박테리아나 조류 등의 초기 도입종의 성장으로 암석은 서서히 토양화된다. 토양화가 진행 중인 석조 문화재의 표면에는 지의류가 기생하게 된다. 지의류는 균류와 조류의 공생체로 성장을 하면서 지의산을 분비한다. 이 지의산은 암석을

풍화시키고, 선태류와 양치식물 등에게 유기물을 제공하게 된다.

이 탑에서 동정된 부착생물종은 균류 2종, 조류 9종, 지의류 12종, 선태류 7종, 고등식물 15종으로 총 45종이다. 이 중 우점종은 지의류에 속하는 *Lepraria sp.*와 *Chlvulgaris*, *Selaginella involvens*, *Parmelia sp.*, *Brachymerium nepalense* 이다. 부착생물은 암종별, 방향별로 피도에 차이를 보인다. 이 중 균류, 조류, 지의류들은 표면에 고착되어 기생하고 있으며, 반점상으로 관찰된다(그림 3A). 성장을 멈춘 지의류는 암석의 표면에서 암흑색으로 변색되어 미관을 해치고 있다(그림 3B, 3C).

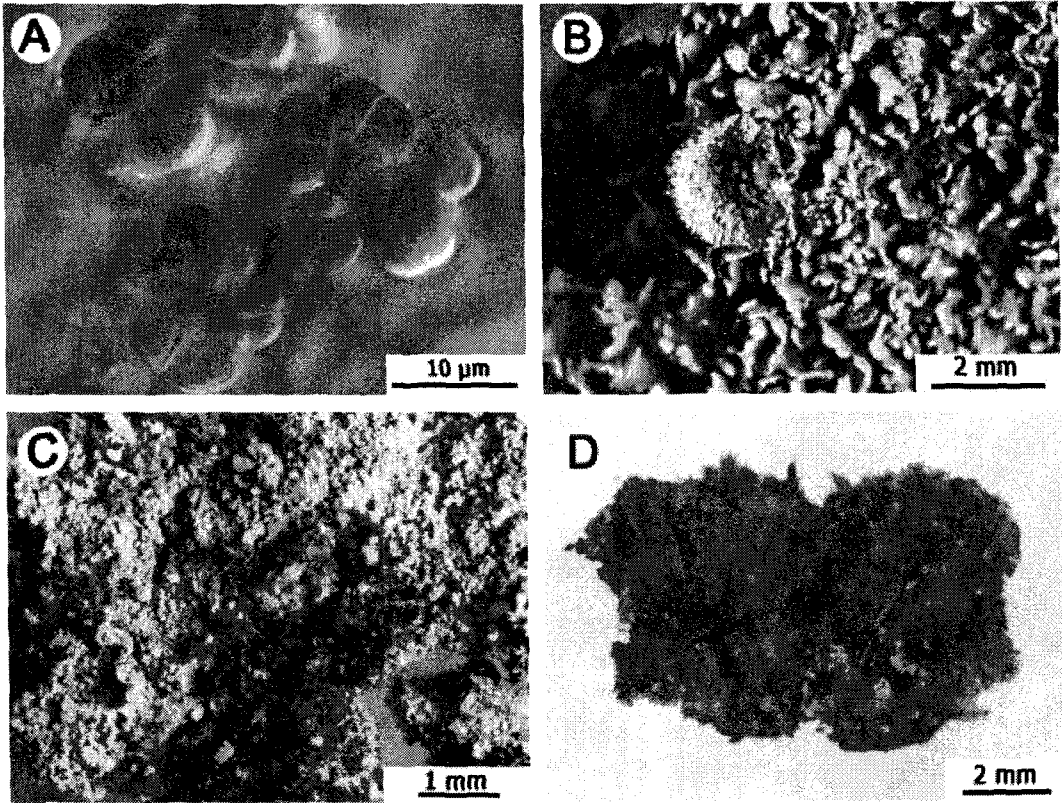


그림 3. 분황사 석탑의 대표적인 부착생물의 동정 결과.I (A) 조류 중 *Protoderma viridis*., 수상지의류의 일종인 *Cladonia sp* (B), 고착지의류의 일종인 *Lepraria sp* (C), 선태류 중 *Ulota crispera* (D)의 모습.

분황사 석탑의 지의류에 따른 피도는 부재별로 조금씩 차이가 있으며 남쪽 보다는 북쪽이 높다. 이는 습기의 응결이 더 쉽게 일어나 번식에 유리한 환경

을 제공하게 되기 때문에 판단된다. 선태류와 초본식물은 기단부와 낙수면의 부재 사이에 서식하고 있으며, 탑신의 감실 내부와 탑신과 기단 사이의 시멘트로 보수된 부분에서도 관찰된다(그림 3D). 초본식물은 기단의 암석 사이에서 관찰되며, 옥개석의 낙수면은 거의 90% 이상의 피도를 보인다.

5. 결 언

1. 분황사 석탑은 여러 암석이 혼용되었으며, 각각의 암석은 아주 다양한 성인을 갖는다. 전석을 이루는 암석은 주로 안산암질암이며, 탑신과 옥개를 이루고 있는 전석은 부분적으로 모서리 마모와 균열이 발생된 것을 제외하면 비교적 풍화와 훼손에 안정한 상태로 보인다. 그러나 옥개의 전석은 다중박리와 박락, 양파껍질과 같은 분해 및 구열상 균열 및 압편상 탈락이 진행 중이다.

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

3. 동남쪽 석수와 동북쪽 석수는 알칼리 화강암이며, 서남쪽 및 서북쪽 석수는 압편질 응회암이다. 각각의 석수의 생물훼손은 90% 이상이며 그밖에 모서리 마모 및 탈락이 진행되었다.

4. 탑신의 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 탑신부 및 북쪽의 탑신부가 가장 심하다.

5. 동쪽 기단부의 중앙은 중심침하를 하고 있으며, 서쪽 1층 탑신부의 중앙은 불룩하게 튀어나와 있어 이를 따라 균열대가 형성되어 있다. 따라서 감실 내부는 우수의 침입에 의해 항상 습한 상태이다. 또한 기단부를 이루는 암석은 모서리 마모와 탈락 및 입상 분해가 진행 중이며, 박리와 박락 및 균열이 발생된 부분도 있다.

6. 이 탑에서 동정된 생물종은 균류 2종, 조류 9종, 지의류 12종, 선태류 7종, 고등식물 15종으로 총 45종이다. 이 중 우점종은 *Chlvulgaris*, *Selaginella involvens*, *Lepraria sp.*, *Parmelia sp.*, *Brachymerium nepalense* 이다. 부착

생물은 암종별, 방향별로 피도에 차이를 보인다.

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