

부여 무량사오층석탑의 풍화훼손도 정밀진단

송치영·이찬희·조영훈

공주대학교 문화재보존과학과

Detailed Deterioration Diagnosis of the Five-storied Stone Pagoda in the Mooryangsa Temple, Buyeo, Korea

Chi Young Song, Chan Hee Lee, Young Hoon Jo

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

1. 서 론

충남 부여군 외산면 만수리 무량사 경내에 자리한 무량사오층석탑은 보물 제185호로 지정된 고려 초기의 석탑으로 사찰 경내의 비교적 안정한 지반 위에 축조되어 있다(Fig. 1). 그러나 구조적으로 심한 불균형을 초래하였으며, 생물학적 오염과 이차적인 무기오염물에 의한 변색 또한 심각하다. 따라서 이 연구에서는 무량사오층석탑을 대상으로 사이트 환경, 구성부재의 기계적, 화학적, 광물학적, 생물학적 및 구조적 훼손도를 평가하였다.

이 연구를 위해 석탑의 정밀조사를 실시하였고 훼손현황에 대해 다양한 정보를 획득하여 이를 근거로 무량사오층석탑의 종합훼손지도를 작성하였으며, 구성암석의 풍화와 훼손인자를 종합적으로 검토하였다. 이 결과는 석탑의 종합적인 보존방안 수립에 필요한 기초 자료이며, 보존처리 전후 관계를 명확히 구분하여, 향후 과학적 보존지침을 수립하는데 기여할 것이다.

2. 현황 및 연구방법

이 석탑은 아무런 보호시설 없이 풍화를 받기 쉬운 야외에 노출되어 있어, 암석구성 성분의 용해에 의한 변색, 생물오염 물질의 피복, 물의 침투에 의한 표면과 불연속

면의 차별침식, 부재의 파손이탈, 표면의 박리현상이 흔하게 나타난다. 따라서 이 조사에서는 석탑 주변에 관한 지형 및 지질조사와 석탑의 물리적, 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사가 함께 수행되어 풍화훼손정도를 세부적으로 기재하고 목록과 색인을 만들어 종합훼손지도를 작성하였다.

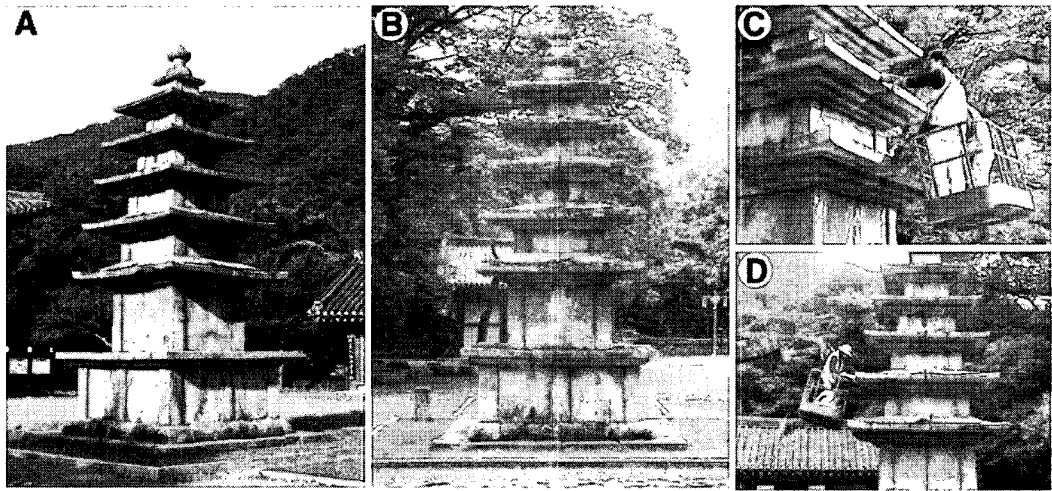


Fig. 1. The field occurrence showing the southwestern (A), northern (B) side of the five-storied stone pagoda in the Mooryangsa Temple. (C, D) Photographs show detailed survey by riding a special vehicle.

주요 구성 부재인 흑운모 화강암에 대해 반정량적인 광물조성과 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성을 관찰하기 위해 주사전자현미경과 편광현미경 관찰을 실시하였다. 또한 부재의 자화강도를 측정하기 위한 대자율 측정도 이루어졌다. 또한 일부 시료를 대상으로 X-선 회절분석과 정량적 화학분석을 실시하여 구성광물과 점토광물 및 지구화학적 거동특성을 검토하였다.

3. 재질특성

무량사오층석탑의 재질은 부분적으로 페그마타이트 세맥이 발달된 중립질의 흑운모화강암으로 석영, 흑운모, 정장석, 사장석, 미사장석 등의 조암광물을 포함한다. 이 중 사장석은 풍화작용을 받아 미문상 조직과 누대구조를 따라 점토광물화 되어있다.

흑운모와 정장석에서는 변질과 풍화로 입자 경계와 벽개면을 따라 발달된 점토광물 또는 녹니석이 관찰된다.

지대석 중 일부는 동일 암종의 신석재로 대체되었고, 상륜부는 저색 사암, 회색 셰일, 화강섬록암 등 각기 다른 암종을 혼용하였다. 이 일대의 지질 분포를 보면 무량사 석탑의 주구성 암석인 흑운모화강암과 다른 암상이므로, 석탑을 건립할 때 주변 지역에서 조달했을 가능성 보다는 좀 더 떨어진 화강암류 분포 지역에서 채석했을 가능성이 크다. 그러나 상륜부의 대체석은 퇴적암 계열이므로 인근에서 흔히 발견되는 암석을 사용한 것으로 추정된다.

주구성 부재인 흑운모화강암에 대해서 전암 대자율을 측정된 결과, 평균 0.06~2.39, 평균 $0.81(\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위로 이 값은 티탄철석 계열에 속하는 화강암류임을 지시하는 것이다. 주성분원소 분석을 통해 암석의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(CIA)와 풍화잠재지수(WPI)를 구해본 결과, CIA는 45.96~52.79의 분포로 높은 값을 보이고, WPI는 -9.03~1.11의 분포로 낮은 값을 보였다. 따라서 이 석탑을 구성하는 암석은 이미 상당한 풍화가 진행되고 있으며, 풍화포텐셜 또한 아주 크다.

4. 풍화상태 및 훼손도 진단

이 석탑의 물리적 풍화는 다른 훼손도에 비해 심각한 편은 아니었으나, 부재간의 이격이 구조적 문제를 초래할 수 있어 보강을 필요로 한다. 부재의 곳곳에 부재의 탈락, 표면 박리·박락, 균열, 파손이탈, 미세열극 등이 관찰되며, 이러한 풍화작용과 함께 석탑 대부분의 옥개석 모서리에서 마모가 진행되었다. 대부분의 부재표면은 유색 광물의 광물학적 풍화작용으로 적갈색 철산화물로 변색되고, 상부 탑신석은 암갈색 망간산화물과 적갈색 철산화물, 회백색 탄산염 침전물로 피복되었다. 또한 강수의 유동흔적을 따라 망간산화물이 반응하면서 수직적인 흑화변색과 2차오염이 거의 모든 면에 걸쳐 분포하고 있으며, 인위적인 훼손까지 가중되어 석탑의 곳곳에 미관을 해치는 한자 묵서들도 관찰된다.

부재의 표면에 균류, 조류, 지의류나 선대류들이 기생하면서 암흑색, 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출되고 이들의 피도는 50~90%로 아주 심각하다. 특히 옥개석 낙수면에 선대류가 집중 분포하며 이는 상당량의 수분을 함유하고 있어 다양한 형태의 풍화작용이 일어날 것으로 보인다. 이 석탑의 가장 큰 문제점은 구조적 불안정으로 북서쪽의 기단감석에서 지반의 불균형에 의한 중심침하가 두드러지며, 지

대석의 신석재 교체 이후에 하대석과의 들뜸현상이 발생하여 이를 더욱 가중시키고 있다.

이러한 풍화상태를 종합하여 두 가지 양상으로 훼손지도를 작성하였다(Fig. 2). 하나는 물리적 및 기계적 풍화에 초점을 맞추었으며, 다른 하나는 화학적, 광물학적 및 생물학적 훼손 양상이 복합적으로 이루어진 변색에 초점을 맞춘 것으로 구분하였다. 이는 육안으로 관찰되는 풍화양상을 도면화하여 그 정도를 비교적 정확하게 파악할 수 있으며 수치화하는데 기여할 것이다. 또한 이 도면은 석탑의 보존관리 지침을 수립하는데 유용한 자료로 활용될 것이다.

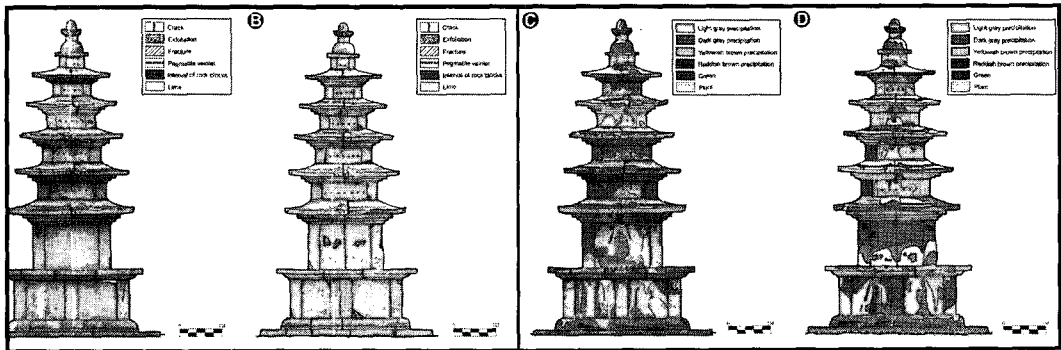


Fig. 2. Detailed survey and deterioration degree of the eastern (A) and western (B) part of the pagoda. Secondary contamination degrees showing the eastern (C) and western (D) part of the five-storied stone pagoda in the Mooryangsa Temple.

5. 고찰 및 제언

무량사오층석탑은 중심침하현상이 나타나는 북쪽과 동쪽의 기단부 부재에 크게 균열이 발생하였는데, 이처럼 탑신의 균열과 박리·박락이 심한 부분에는 보존처리용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 할 것이다. 또한 이차적 오염현상인 암석의 변색과 강수의 유동흔적을 따라 나타나는 암회색 및 적갈색 침전물, 탑의 이격된 틈에 삼입된 철편에 의한 잔류물 등은 암석 내부로 깊게 침투되어 안전한 제거가 불가능할 것으로 예상되므로 먼지와 표면오염물에 제한하여 정기적인 세정이 실시되어야 한다.

이 석탑은 생물오염의 피도가 심각한 수준인데, 이들은 부재의 부분오염 뿐 아니라 지의산에 의해 재질을 변화시키고 이의 부식생성물과 물리적 압력 증진으로 부재

약화를 초래할 것이다. 이들의 특성을 잘 파악해 그에 맞는 효과적인 제거 방안이 논의되어져야 한다. 이 탑에는 부재간의 뒤틀림이나 이격으로 인해 구조적 안정성에 위협을 가하고 있진 않으나 지반의 약화나 불안정 현상이 발생되어 있다. 따라서 정밀 안전진단을 실시하여 현재의 상태를 정확하게 파악하고, 중장기적인 모니터링을 통해 구성 부재의 거동도 또한 면밀하게 검토해야 할 것이다.

6. 결 론

1. 무량사오층석탑의 구성암석은 중립질의 흑운모화강암으로 탑의 곳곳에 페그마타이트 세맥이 관찰되기도 한다. 지대석 중 일부는 동일 암종의 신석제로 대체되었고, 상륜부에서는 저색 사암, 회색 셰일, 화강섬록암 등 각기 다른 암종이 사용되었다.

2. 이 탑의 가장 심각한 문제는 지반의 중심침하에 따른 구조적 불안정으로, 북서쪽의 기단갑석에서 두드러진다. 남측면에서 바라본 상륜부 또한 오른쪽으로 기울어짐이 확인되는 것으로 보아 석탑의 구조적 안정을 위한 지반공학적 보강방법이 필요할 것이다.

3. 이 석탑의 풍화현상은 자연적 및 인위적인 복합원인이 작용한 결과이며 표면 박리, 박락과 미세열극, 균열, 부재 탈락 등이 관찰되고, 망간산화물, 철산화물이 강수의 유동흔적을 따라 변색되었음을 확인하였다. 또한 옥개석 낙수면에 선탐류의 피도가 집중 분포하며 생물학적 풍화작용을 가중시키고 있다.

4. 이 탑의 요인별 풍화훼손에 따라 정밀평가를 하고자 종합 훼손도를 작성하였다. 이 훼손도를 근거로 석탑의 방위에 따른 모든 부재에 대하여 구성암석의 풍화와 훼손인자를 평가했으며, 이 결과는 향후 보존방안을 검토하는데 기여할 것이다.

5. 탑신의 균열과 박리, 박락이 심한 부분에는 보존처리용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 할 것이다. 이차적 오염현상인 암석의 변색과 강수의 유동흔적을 따라 나타나는 암회색 및 적갈색 침전물, 탑의 이격된 틈에 삼입된 철편에 의한 잔류물 등의 효과적인 세정이 실시되어야 한다.