

안성 청룡사삼층석탑의 풍화훼손도 진단과 보존처리

이선명¹ · 이명성¹ · 조영훈¹ · 이찬희^{1*} · 전성원² · 김주옥² · 김선덕²

¹공주대학교 문화재보존과학과, ²서진문화유산(주)

Deterioration Diagnosis and Conservation Treatment of the Three-storied Stone Pagoda in the Cheongryongsa Temple, Anseong, Korea

Sun Myung Lee¹, Myeong Seong Lee¹, Young Hoon Jo¹, Chan Hee Lee^{1*}
Seong Won Jeon², Ju Ok Kim² and Sun Duk Kim²

¹Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

²Seojin Cultural Heritage Conservation Co. Ltd., Gwangmyeong, 423-810, Korea

Rock materials of the three-storied stone pagoda in the Cheongryongsa temple in Korea are mainly composed of gneissose two-mica granite and fine-grained granite. This stone pagoda shows structural instability due to cracks and breaking-out of the stones. The surface properties of the stone is highly degraded by various inorganic pollutants and epilithic biospecies. Therefore, this study carried out comprehensive deterioration diagnosis by non-destructive methods, and some conservation treatments base on the diagnosis were carried out to reduce weathering progress. As the treatments, the biospecies and lichen that covering on the stone surfaces were removed by dry and wet cleaning, and degraded concrete applied to the pagoda for restoration in the past was removed and repaired with epoxy resin. Oxidized iron plates inserted between the rock properties were also substituted titanium stainless steels. After all processes are completed, we sprayed consolidant on the rock surface. Finally, the ground of the stone pagoda was rearranged using small rock aggregates, and the fence was established for control of artificial deterioration by visitors and environmental maintenance.

Key words : Gneissose two-mica granite, Fine-grained granite, Deterioration diagnosis, Conservational treatment

안성 청룡사삼층석탑의 구성암석은 대부분 편마상 복운모 화강암과 세립질 화강암으로 이루어져 있다. 이 석탑은 거의 전면에 걸쳐 나타나는 부재의 균열과 결실이 탑의 구조안정성을 위협한다. 또한 표면의 무기오염물과 다양한 서식형태를 갖는 생물침해는 석재표면의 손상을 가중시키고 있다. 따라서 이 연구에서는 석탑에 대한 종합적인 비파괴 훼손도 진단을 수행하고 이를 근거로 풍화를 저감시키기 위해 최소한의 보존처리를 수행하였다. 보존처리에서는 석탑의 전면에 걸쳐 자생하는 지의류 및 생물오염물을 건식 및 습식 세정하였으며, 과거 이 석탑의 보수에 사용되었던 노화된 콘크리트를 제거하고 합성수지를 이용하여 복원하였다. 부재사이에 삽입된 부식된 철편은 티타늄 강철 합금으로 교체하였으며, 모든 공정이 완료된 후에 석질 강화처리를 실시하였다. 또한 석탑의 지반과 주위환경을 보강하고 정비하였으며 관람객에 의한 손상을 제어하기 위한 보호시설을 설치하였다.

주요어 : 편마상 복운모 화강암, 세립질 화강암, 훼손도 진단, 보존처리

1. 서 론

모든 암석의 풍화작용에 가장 중요한 매개체는 물이며, 물-암석 반응은 조암광물의 조직, 색, 화학조성, 형

태 및 물리적 강도를 변화시킨다. 또한 이로 인해 생성된 풍화잔류물이 결정화되면서 부피가 팽창하여 암석의 분해를 가속시킨다. 대부분의 석조문화재 구성암석도 동일한 메카니즘에 의해 풍화과정을 겪고 있다. 이

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

와 같은 석조문화재의 풍화특성은 국내외의 많은 연구자들에 의해 논의되어 왔다(Fidler, 2002; Lee *et al.*, 2006c; Lee *et al.*, 2005b; Nesbitt and Young, 1984).

석조문화재의 대부분은 옥외에 노출된 상태로 위와 같은 자연적인 풍화과정과 인위적인 훼손에 의해 손상되어 문화재로서의 원형과 가치를 상실해 가고 있다. 이 과정에는 수많은 요인들이 복합적으로 작용한다. 따라서 우리나라의 석조문화재에 대한 체계적인 보존시스템을 확립하기 위해서는 구성암석의 재질특성을 바탕으로 정량적 풍화훼손도 진단을 통해 손상요인을 명확히 규명하는 보존과학적 연구가 필수적으로 수행되어야 한다. 이에 관하여는 최근 국내에서도 상당한 진전을 보이고 있으며 국제적으로도 주목받고 있다(Lee *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2006b; Lee *et al.*, 2005c; Lee and Yi, 2007).

안성 청룡사삼층석탑은 문화재자료 제59호로 지정되어 있으며, 일반적인 고려시대 석탑양식을 보인다. 이 석탑은 우리나라 대부분의 석조문화재와 마찬가지로 사찰 경내에 아무런 보호시설도 없이 노출되어 물리적, 화학적, 생물학적 풍화와 인위적인 훼손에 의해 복합적으로 손상된 상태이다. 따라서 이 석탑의 풍화를 지연시키고 더 이상의 오염과 훼손을 미연에 방지하기 위한 보존처리가 절실하게 요구되어 왔다.

이 연구에서는 청룡사삼층석탑을 구성하는 암석의 재질특성을 밝히고 손상유형별 정밀진단을 통해 비파

괴적인 평가방법으로 풍화훼손도를 정량적으로 검토하였다. 이를 근거로 이 석탑의 보존방안을 제시하고 부분적인 보존처리를 실시하였다. 이 결과는 석탑의 보존을 위한 안정적이고 장기적인 관리에 중요한 근거가 될 것이며, 나아가 석조문화재의 과학적 보존처리 시스템 확립을 위한 중요한 자료로 활용될 것이다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

안성 청룡사삼층석탑은 경기도 안성시 서운면 청룡리 28번지에 있으며, 이 지역은 충청남북도와 경계를 접하는 경기도 남쪽의 서운산 기슭에 자리한다. 고려 원종 6년(1265년) 명본대사가 창건한 이 절은 창건 당시에는 암자규모 정도로 대장암이라 하였다. 이후 공민왕 13년(1364년)에 크게 중창하고 청룡사로 고쳐 불러 비로소 면모를 갖춘 것으로 추정되는 유서 깊은 사찰로 조선 초기까지도 왕실의 원찰이었던 곳이다. 현재 이 사찰에는 청룡사대웅전(보물 제824호), 청룡사영산회괘불탱(보물 제1257호), 안성청룡사동종(보물 제114호), 청룡사감로탱(보물 제1302호) 등이 소장되어 있다.

이 석탑은 대웅전 앞에 위치하며 정면방향은 서쪽을 향하고 있다(Fig. 1A). 이 석탑의 주변환경은 사찰 내에 잔자갈로 마련한 평탄지에 있어 대체적으로 양호

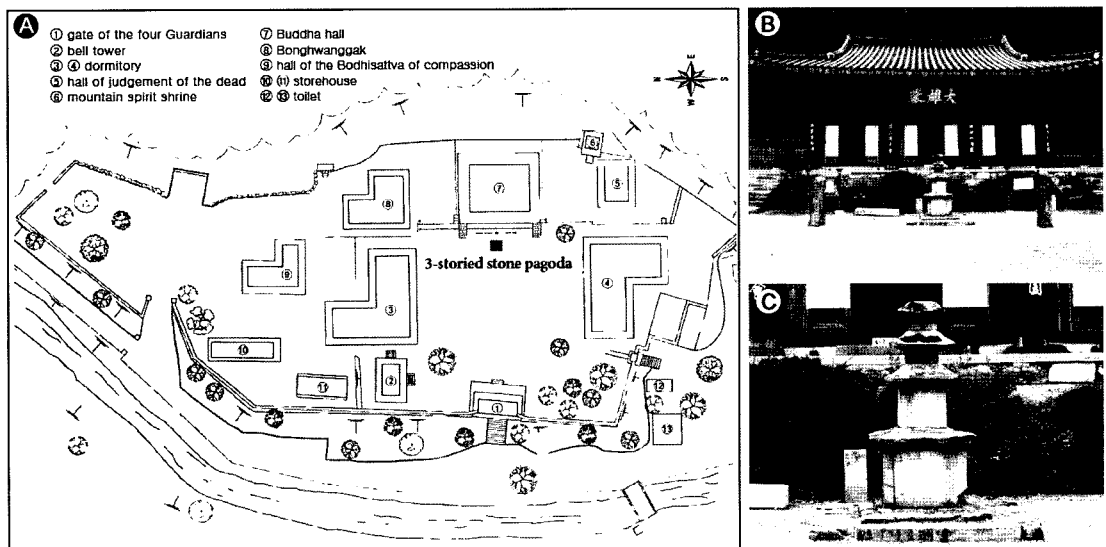


Fig. 1. Cheongryongsa temple layout and field occurrence of the stone pagoda in the Cheongryongsa temple. (A) An arrangement plan of the Cheongryongsa temple. (B) Surrounding environment of the stone pagoda. (C) Western frontal view of the stone pagoda.

한 편이나 우기에는 석탑의 우측(북쪽)과 정면(서쪽) 방향으로 자갈의 유실과 함께 물고임 현상이 보이는 것으로 보아 배수가 용이하지 않음을 알 수 있다. 또한 이 석탑의 배면에 위치한 대웅전과 초본 및 관목에 영향을 받아 다른 면에 비해 석탑의 배면이 항상 습윤한 상태이며 생물에 의한 훼손이 가중되어 있다(Fig. 1B).

이 석탑은 평면방형의 단층 기단 위에 3층 탑신을 올린 높이 2.4m의 일반형 석탑으로 고려시대 석탑의 양식을 충실히 보여준다(Fig. 1C). 단층의 기단은 지대석 위로 하대갑석과 각 면에 양 우주와 탕주가 표현된 4매석의 상대중석 및 상대갑석으로 구성된다. 탑신석과 옥개석은 각각 하나의 석재로 이루어져 있고, 탑신의 각 면에는 양 우주가 정연히 모각되었다. 1층 탑신에 비해 2층의 높이가 급격히 낮아져 비례가 흐트러진 일면을 보여준다. 옥개석은 경사가 급하다가 전각에 이르러 살짝 반전되어 경쾌한 일면을 보이고 합각선이 뚜렷하며 옥개받침은 4단 층급으로 이루어져 있다. 이 석탑의 상륜부는 모두 결실된 상태이다(CHA, 2007).

2.2. 연구방법

이 연구를 위해 청룡사 석탑의 구성부재에 대한 재질특성과 보존과학적 풍화훼손도를 정밀 진단하였다. 또한 실내연구를 위해 석탑에서 탈락된 암편을 분석용 시료로 채취하였다. 석탑 부재를 구성하는 암석의 종류와 조직적인 특성은 풍화단계를 해석할 수 있는 가장 중요한 자료이다. 따라서 구성부재의 암석학적 특징에 대한 정밀 육안관찰과 함께 전면에 걸쳐 전암대자율을 측정하였다. 계측기기는 10^{-5} 단위의 측정한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 이용하였으며 대자율의 단위는 10^{-3} SI 단위계로 표기하였다.

수습한 암석시료는 반정량적인 광물조성, 구성광물의 광학적 특징과 상호관계를 통한 조직, 변질광물의 생성을 관찰하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 편광현미경은 자동계수기가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다. 정밀한 동정을 위하여 일부 시료에서 X-선 회절분석을 실시하였으며, 분석기기는 Rigaku계 모델 D/Max-IIb로, X-선은 CuK α 에 조건은 40 kV와 100 mA이다. 석탑 표면의 풍화에 따른 생성광물과 오염물의 산출상태를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다. 주사전자현미경의 모델은 Oxford사의 에너지 분산형 성분 분석기(EDX, Inca M/X)가

장착된 JEOL사의 JSM-6335F이다. 분석시료는 백금으로 코팅하여 이용하였다.

이 석탑의 풍화 및 훼손상태에 대한 종합적인 진단을 위해서 요인별 훼손상태를 진단하고 실측도면을 바탕으로 종합훼손지도를 작성하였다. 훼손도면 작성에 사용된 프로그램은 2D 그래픽 전문응용프로그램 중 어도비 일러스트(Adobe Illustrator)이다. 육안적 현상연구를 정량화하기 위해 비파괴 진단법 중에 하나인 초음파속도를 측정하였으며 이를 근거로 방위별 입면도에 초음파 전달 속도를 투영하여 전체적인 풍화도를 파악하였다. 초음파 탐사기는 CNS FARNELL사의 Model PUNDIT PLUS이며 2D 모델링을 위해 Window용 Surfer 프로그램을 이용하였다.

3. 부재의 재질특성

3.1. 암석 및 광물학적 특징

안성 청룡사삼층석탑이 있는 서운산(547 m) 일대는 편마암류, 섬록암류, 화강암류, 암맥류 및 층적층으로 구성되어 있다(Kang *et al.*, 1980). 편마암류는 암상에 따라 호상편마암, 흑운모편마암, 안구상 편마암 및 화강암질 편마암으로 구분되며 청룡사일대의 기반암을 이루고 있다. 섬록암은 안성시와 인접한 충남 천안시 북면 대평리에 소규모 분포하며 편마암류를 관입한다. 화강암류는 암상에 따라 조립질 화강암, 편마상 복운모 화강암으로 구분된다. 이들 화강암은 편마암류를 관입접촉하며 저구릉상 지형을 보인다. 염기성 및 산성 맥암은 주로 편마암류 분포지역에 많이 발달되었고 남북방향이 우세하다. 층적층은 소규모로 분포하며 조사지역 북서부의 화강암류와 남동부의 흑운모편마암을 부정합으로 덮고 있다.

정밀 야외조사와 실내연구 결과, 이 석탑을 구성하는 암석은 조립에서 세립질의 편마상 복운모 화강암과 세립질 화강암이 대부분을 이루고 있다. 부분적으로는 화강암질 편마암, 안산암질암, 안구상 편마암을 혼용하였다. 석탑의 주요 구성암석인 편마상 복운모 화강암은 조립의 편마상 구조를 보여주며 석영, 장석, 흑운모 등이 조암광물을 이룬다(Fig. 2A). 세립질 화강암은 전체적으로 폭 1cm 이하의 페그마타이트 세맥을 골고루 갖추고 있으며 남측면 1층 탑신석 상부에서는 염기성 포획암이 관찰되기도 한다(Fig. 2B, 2C).

이 석탑의 구성암석에 관한 광물조성, 미세조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성을 밝히고자 석탑에서 탈락된 미세시편으로 박편을 제작하여 편광현미경 관찰

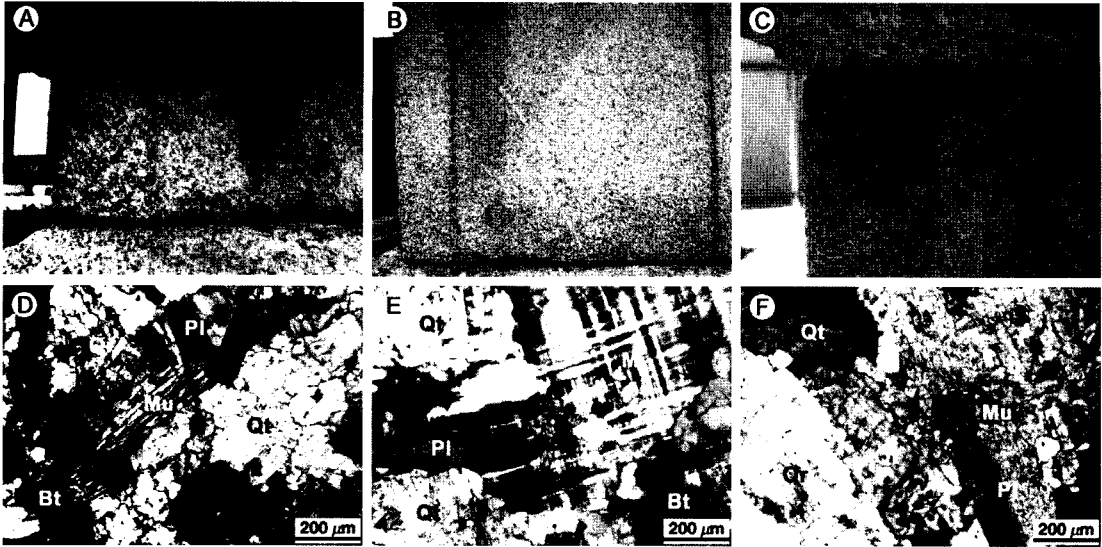


Fig. 2. Lithology and microphotographs showing the major constituting rocks of the stone pagoda. (A) The 2nd floor body rock composed of gneissose two-mica granite. (B, C) Fine grained granites consist in the 1st floor body and basement rocks which are partly developed of pegmatite veinlet and basic xenolith with several centimeters. (D, E) Microphotographs showing gneissic granite forming minerals of the quartz, orthoclase, plagioclase, biotite and muscovite. (F) Quartz, orthoclase, plagioclase and mica assemblages of fine grained granite. Most feldspar and mica are partly altered to sericite and chlorite, respectively, along the grain boundaries and cleavages.

을 실시하였다. 이 결과, 석탑부재의 조암광물은 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등이며 부정분 광물로 스펀, 각섬석 및 불투명 광물이 관찰된다 (Fig. 2D, 2E, 2F). 사장석은 쌍정을 따라 부분적으로 견운모화 되었고, 정장석은 내부가 외각보다 더욱 변질된 모습을 보이며 심한 풍화작용을 받았다. 석영에는 미세균열이 발달되어 있으며 흑운모도 입자경계나 벽개면을 따라 녹니석화 작용을 받았다.

조암광물의 정밀한 동정을 위해 석탑에서 탈락된 미세시료 중에서 편마상 복운모 화강암과 세립질 화강암을 대상으로 X선 회절분석을 실시하였다. 이 결과, 모든 시료에서 화강암의 구성광물인 석영, 정장석, 사장석, 운모 등이 공통적으로 동정되었다. 이는 편광현미경을 통해 관찰된 구성암석의 조암광물과 일치하며, 풍화가 많이 진행된 일부시료에서는 스�멕타이트와 녹니석이 검출되기도 하였다.

3.2. 전암 대자율

이 석탑을 구성하는 암석을 대상으로 전암 대자율을 측정하였다. 전암 대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로 외부자기장에 대한 자화강도를 의미하며 $I=k \cdot H$ 로 정의된다. 여기서 I 는 자화강도, H 는 자기장이며 k 는 대

자율이다. 대자율은 물질의 자기적 특성을 결정하는 상수로 암석에서 불투명 광물로 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량에 의해 크게 좌우되며 서로 정의 상관관계를 가진다.

이 값은 진공에서 $k=0$ 이며 일반적인 화강암의 대자율은 $2.512(\times 10^{-3}$ SI unit)이다. 이 대자율은 $1.256(\times 10^{-3}$ SI unit)을 기준으로 이 값보다 높으면 자철석 계열로 낮으면 티타철석 계열로 분류하며 화강암의 성인적 특성과 광역적 분포를 파악할 수 있다(Ishihara, 1998). 이는 근본적으로 마그마의 산소분압 차이에서 비롯되는 기원물질, 지각물질의 오염 및 분화에 따른 분별정출작용 등에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다. 따라서 대자율을 통한 두 계열의 분류는 원래의 화강암 분류체계에서는 고려되어 지지 않은 지질환경의 차이를 반영한다. 이는 화성암질 암석의 성인적 동질성을 파악할 수 있는 효과적인 방법으로, 국내의 석조문화재와 석기의 원산지를 해석하는데 적용되어 문화재의 원형복원에 활용되고 있다(Lee *et al.*, 2005a; Lee *et al.*, 2006a; Uchida *et al.*, 1998; 2006; Lee *et al.*, 2007).

청룡사삼층석탑의 대자율 측정은 석탑의 각 방향에서 전면에 걸쳐 실시하였으며, 총 172점을 측정하였다 (Fig. 3). 이 석탑을 구성하는 암석 중에서 편마상 복

운모 화강암은 측정값이 0.02~1.70($\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위에 분포하며 평균 0.34의 비교적 낮은 수치를 갖

는다. 한편 세립질 화강암과 화강암질 편마암은 각각 0.01~0.13($\times 10^{-3}$ SI unit)과 1.08~1.88($\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위 내에서 분포하며 평균 0.06과 1.40의 수치를 갖는 것으로 나타났다.

부재의 위치와 방향에 따른 대자를 값은 별다른 차이를 보이지 않았으나 석탑을 구성하는 암석의 종류에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 이는 이 석탑을 구성하는 주요 탑재의 암석이 3종류의 화강암질암으로 이루어져 있다는 중요한 증거이며, 향후 석탑 부재의 원산지를 해석하는데 유용한 정보로 활용할 수 있을 것이다.

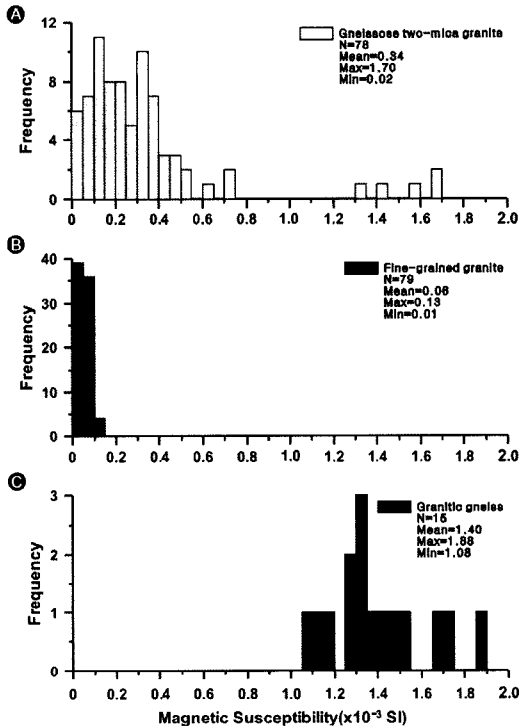


Fig. 3. Diagram showing magnetic susceptibilities of the constituting rock for the stone pagoda. (A) Gneissose two-mica granite. (B) Fine-grained granite. (C) Granitic gneiss.

4. 풍화훼손도 진단

4.1. 기계적 풍화와 구조안정성

암석의 물리적 및 기계적 풍화작용은 주로 암석내부의 공극과 불연속면을 따라 발생하는 수분의 이동, 온도변화, 동결과 융해의 반복을 통한 쉼기작용 등에 의해 일어난다. 또한 물-암석 반응에 의해 생성되는 풍화산류물의 결정작용 및 주변의 식물생장에 의한 기계적 훼손 등 큰 화학적 변화 없이 암석의 불연속면을 따라 조암광물의 입자들이 분해되며 가속된다. 이와 같은 현상은 지속적인 반복에 의해 석조문화재 구성암석의 박리와 박락, 균열 및 절리로 발전되어 구조적 불안정성을 야기하기도 한다.

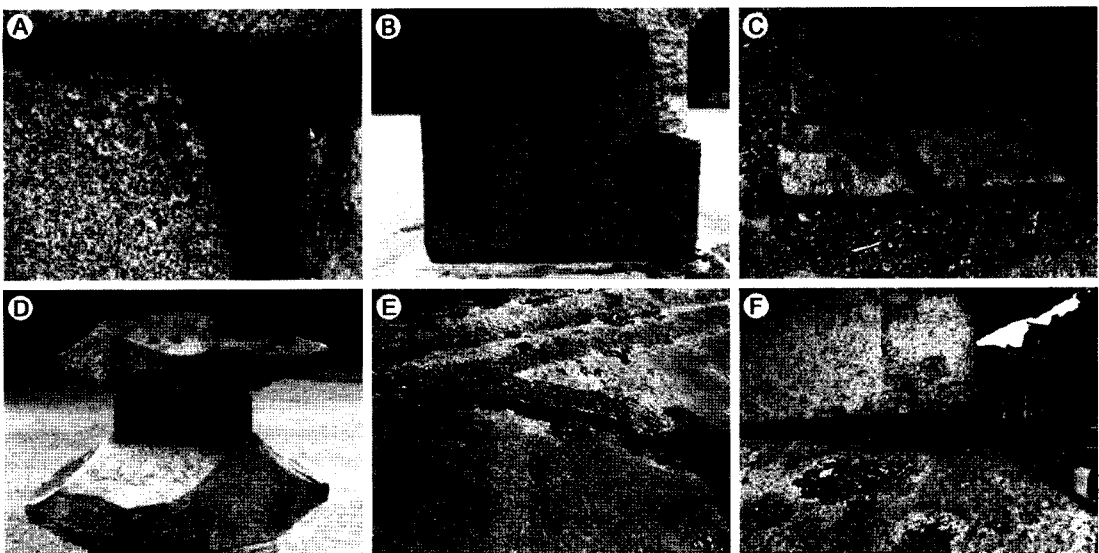


Fig. 4. Physical deterioration and structural instability of the stone pagoda. (A) Surface exfoliations of the body stones. (B) Cracks developing along the pegmatite vein. (C, D) Broken out along the corner of the stone properties. (E) Part that is treated by cement was discolored and degraded. (F) Inserted of iron plates do not check horizontality.

청룡사삼층석탑에서는 아주 다양한 기계적 풍화가 발생되어 있다. 특히 부재의 탈락된 단면과 옥개석 하부를 중심으로 표면의 박리박락이 관찰된다(Fig. 4A). 또한 석탑의 곳곳에서는 수직 또는 수평에 가까운 다양한 산출상태를 갖는 균열이 발달한다(Fig. 4B). 이 균열들은 대부분 암석에 발달한 페그마타이트 세맥을 따라 차별풍화를 받아 생성된 것이며, 부재의 응력 약화와 암석의 불연속면을 따라 진행된 층상 미세 균열 등 다양한 형태로 부재의 기계적 풍화를 촉진시켰다.

이 석탑의 부재는 대부분 모서리를 중심으로 탈락이 심각한 상태이다. 특히 기단부와 옥개석에서 훼손이 심각하여, 기단부의 경우 부재가 탈락되어 이탈된 상태이며 탈락된 부재는 유실될 우려도 있다(Fig. 4C). 또한 옥개석을 비롯한 대부분의 부재는 일부분이 탈락되어 결실된 상태이다(Fig. 4D). 이러한 석탑 부재의 불규칙적 탈락은 석탑의 전반에 걸친 하중의 편달을 발생시키는 등 구조적 안정성을 위협한다. 한편 과거 석탑의 보수에 사용된 시멘트 몰탈은 대기환경에서 자연풍화 과정을 통해 박락되고 변색된 상태로 노출되어 있다(Fig. 4E). 또한 부재 간의 수평을 위해 삽입한 철판은 불규칙한 형태로 산화되었으며 일부 수평에 맞지 않는 것도 있어 보수와 정비 및 재처리가 불가피한 실정이다(Fig. 4F).

4.2. 무기오염물에 의한 훼손

일반적으로 암석의 화학적 풍화는 기후, 대기환경, 식생 등에 영향을 받으며 광물성분, 조직, 내부 공극 및 균열에 의해 풍화작용이 촉진된다. 다양한 풍화환경에 노출된 석조문화재는 이와 같은 화학적 풍화작용이 복합적으로 작용하여 표면의 변색뿐만 아니라 암석 및 광물의 성분, 성질과 조직이 변화되어 재질이 약화되고 표면의 손상이 진행되어 이미 문화재로서의 원형을 상실한 경우가 많다.

청룡사삼층석탑은 전면에 걸쳐 광물의 화학적 풍화 생성물이 표면에 침착 또는 침전되어 있으며, 부분적으로는 무기오염물에 의해 원암의 조직과 색이 변질된 상태이다. 이 석탑의 표면에서는 적갈색 변색이 흔하게 관찰된다(Fig. 5A). 이는 강수에 직접적인 영향을 받은 암석표면을 중심으로 유색광물이 풍부한 곳에 있는 Fe^{2+} 성분이 유리되어 나와 갈철석이나 적철석을 형성하여 광물을 화학적으로 분해시키고 암석 표면으로 용출되어 나타나는 현상이다.

또한 불균형 부재 간에 수평을 맞추기 위해 삽입한 철판이 있는 부분에서는 부재 표면에 철판의 산화물이 산재하며, 이를 중심으로 강수의 유동 흔적에 따라 황갈색으로 변색된 것을 관찰할 수 있다(Fig. 5B). 이는 외부에 노출된 철판이 다양한 형태의 환경인자와 반응하여 산화철을 형성하고 강수의 흐름에 따라 암석 표면에 침착되어 변색을 일으키는 것으로 광물 내 산화과정보다 쉽게 진행되며 미관을 해치는 요인이다.

시멘트 몰탈로 충전접합한 부분과 기단부 일부 부재의 표면에서는 암흑색 변색이 관찰된다(Fig. 5C). 이와 같은 암흑색 변색은 유색광물이 변질되어 나타나는 경우도 있으나, 표면 오염상태로 보아 이차적 오염물질인 시멘트 몰탈과 강회성분이 주변 대기환경에서의 다양한 오염인자와 반응하여 암석 표면에 침착된 것으로 보인다. 이는 전체적으로 석탑의 미관을 해치는 것은 물론이고 또 다른 이차적 오염물을 생성시켜 표면 풍화를 촉진시킬 것이다.

4.3. 생물학적 풍화 및 훼손

암석의 생물학적 풍화 및 훼손은 크게 식물, 동물, 미생물에 의해 이뤄지나 대부분 균류나 지의류 같은 미생물의 침착에 의해 시작된다. 대기환경에 노출된 석조문화재의 표면풍화는 다양한 환경 인자들의 복합적인 작용에 의해 표면에 토양층이 조성되면서 진행된다. 이

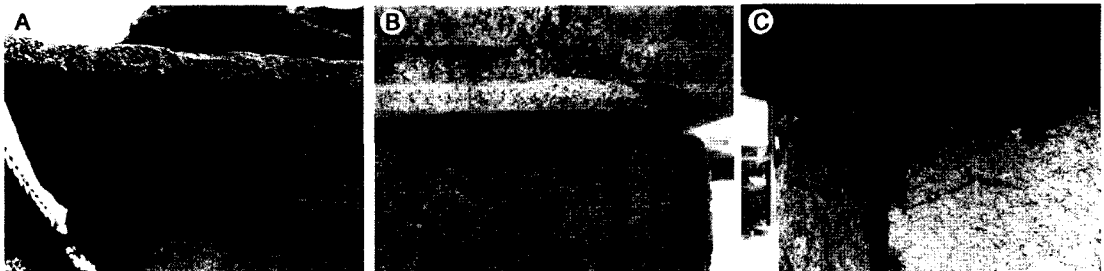


Fig. 5. Surface discoloration of the stone pagoda. (A) Reddish brown discoloration is observed on the 2nd roof underpinning rock. (B) Yellowish brown discoloration show near the iron pieces that used to adjust horizontality. (C) Dark gray discoloration is mainly observed the part that is treated by cement.

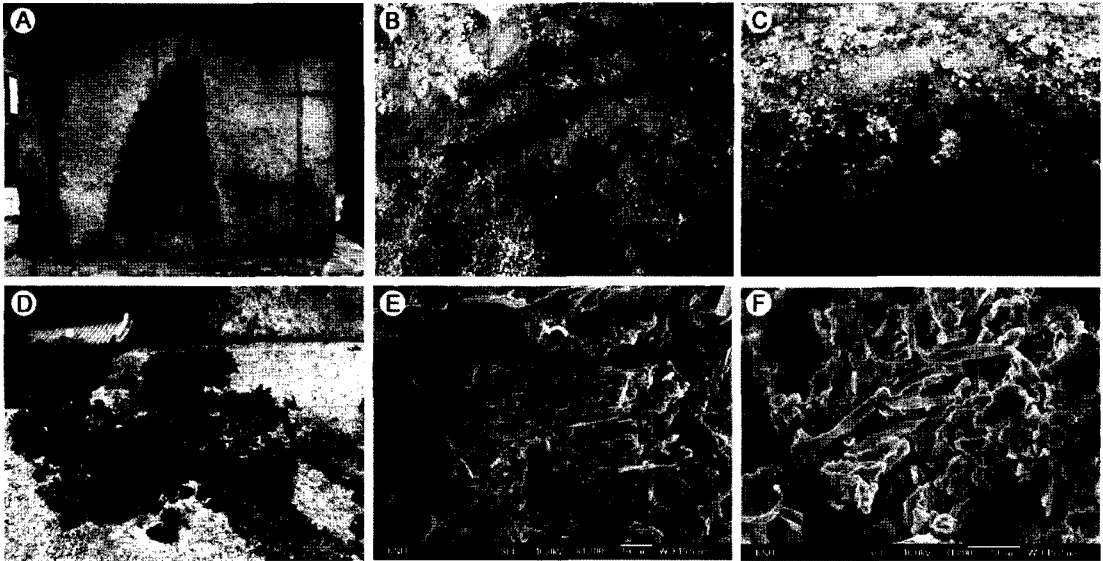


Fig. 6. Biological contaminants and scanning electron microphotographs (SEM) of the stone pagoda. (A) Appearance of the dark gray algae on the surface of the basement face stone. (B) Gray and dark gray crustose lichen on the surface of roof stone. (C) Green and dark green lichen show such as besprent form. (D) Bryophyte show various appearances on the roof stone. (E, F) SEM images of clay minerals and rootlets of lichen and algae grow at the near surface of the rock properties.

는 유기물의 중요한 발생학적 요인을 구성할 수 있는 장소를 제공하며 여기에 유황 박테리아나 남조류 등의 초기 도입종이 암석의 토양화를 진행시키면 지의류나 선대류 등의 출현을 가속한다.

이와 같은 미생물들은 암석 표면에서 뿌리나 균사가 가하는 물리적인 압력과 대사과정에서 생성되는 유기산을 공급하여 암석의 분해와 풍화작용을 촉진시킨다(May *et al.*, 1993). 또한 선대식물이나 양치식물 등에게 유기 영양분을 공급하여 고등식물의 서식처를 제공하며 생물학적 훼손을 가중시킨다. 청룡사삼층석탑은 기단부와 옥개석 상부를 중심으로 생물오염이 상당히 진행된 상태이다. 이 석탑의 지대석에서는 지반 환경의 충분한 토양과 수분으로 초본식물이 성장하고 있다. 또한 석탑 표면에서는 조류가 착생하여 암석의 생물학적 훼손의 도입을 마련하고 있다(Fig. 6A).

기단부와 옥개석 상부에서는 회색 및 암회색의 고착지의류가 반점상으로 전면에 걸쳐 분포하고 있다(Fig. 6B). 이와 함께 암석 표면에 산포상으로 성장한 녹색 및 암녹색의 지의류에서는 석탑 표면의 미세토양층 형성과 진딧물의 서식을 확인할 수 있다(Fig. 6C). 또한 석탑의 곳곳에서는 다양한 산출상태를 보이는 선대류가 관찰되는데, 이는 주로 옥개석 상부에 분포한다(Fig. 6D). 표면풍화로 인해 박락된 미세 압편을 주사전자현미경을 통해 관찰하였다. 이 결과, 암석의 조

암광물인 장석이 점토광물화되고 식물체의 조직이 확인되었다(Fig. 6E, 6F). 이는 암석 내부의 상당 깊이까지 생물오염이 진행되었으며, 석탑 표면이 토양화되고 있음을 입증하는 것으로서 이에 대한 대비가 시급함을 지시하는 것이다.

4.4. 풍화훼손도 정량평가

청룡사삼층석탑의 정밀 훼손도 진단을 바탕으로 석탑 표면에서 확인되는 훼손유형에 대해 분류하고 이를 정의하였다. 또한 Fitzner(2004)의 방법을 응용하여 종합훼손지도를 작성하였다. 훼손유형은 균열, 박리박락, 탈락, 시멘트몰탈, 철판고임 등과 같은 물리적 유형과 황갈색, 적갈색, 암흑색 변색, 지의류, 선대류, 조류, 초본식물과 같은 화학적 및 생물학적 요인으로 분류하였다. 이를 범례로 훼손상태를 종합하여 석탑의 방위에 따라 도면화 하였으며 훼손유형에 따른 사진자료도 함께 제시하였다. 이 풍화훼손 지도와 분포양상을 통해 특징적인 풍화형태와 유형간의 상호관계를 파악할 수 있다(Fig. 7A, 7B, 7C). 또한 이 지도는 보존처리의 기본도면으로도 이용하였다.

육안관찰을 통한 현상적 연구로부터 얻어진 결과를 보완하고, 이를 입증하며 정량화하기 위해 훼손지도 작성영역에 대해서 모든 부재의 초음파 탐사를 실시하였다. 측정된 초음파 속도는 훼손지도와 동일한 도면에

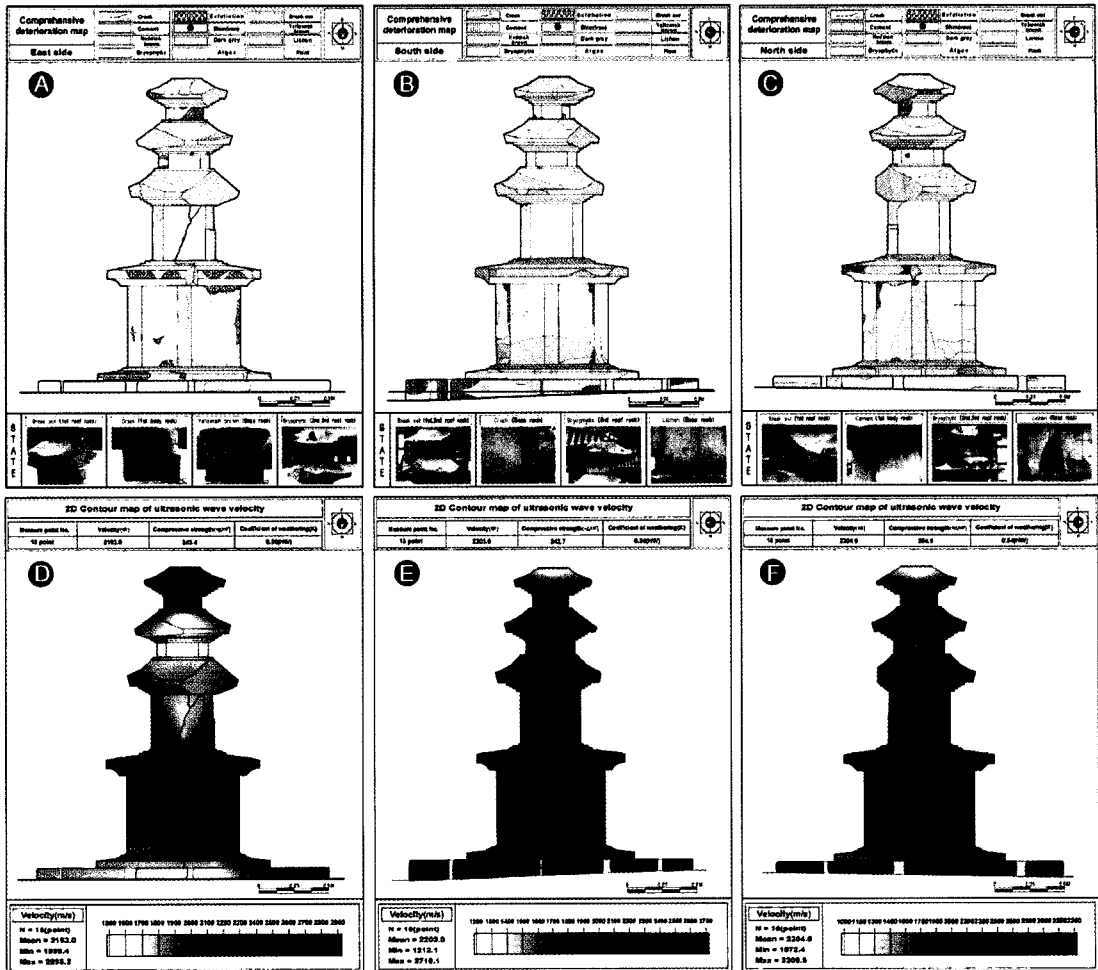


Fig. 7. Comprehensive deterioration maps and 2D modeling contour maps of ultrasonic velocity for the stone pagoda. (A, B, C) Deterioration maps showing eastern, southern and northern sides of the stone pagoda. (D, E, F) Ultrasonic velocity maps of the eastern, southern and northern sides of the stone pagoda.

등고밀도선의 방식으로 도면화하여 전체적인 물리적 풍화도를 분석하였다(Fig. 7D, 7E, 7F). 이와 같은 자료들은 궁극적으로 주요 훼손요인과 손상의 위험성을 예측하게 하고 보존처리에 대한 필요성 판단과 적합한 방법 및 적용의 근거자료가 될 것이다.

종합 훼손지도를 통해 각 부위별 훼손상태를 살펴본 결과, 이 석탑은 전체적으로 무기물에 의한 변색과 생물학적 오염으로 인해 표면 풍화가 가중된 상태로, 특히 기단부와 옥개석 상부에서 훼손양상이 두드러졌다. 또한 표면풍화로 인한 암석의 재질약화와 모서리를 중심으로 나타나는 부재의 결실은 약화된 응력으로 인해 부재간 하중 전달을 발생시켜 구조안정성을 위협할 것으로 예측되었다. 방위별로 살펴보면, 동측면과 북측면이 다른 측면에 비해 표면 오염물과 부재의 균

열 및 박리박락과 탈락이 복합적으로 작용하여 집중적인 보존처리가 필요할 것으로 나타났다.

풍화훼손지도를 통한 유형별 분포양상에 대해 정량적인 풍화도를 살펴보고자 측정된 초음파 속도로 방위별 분석을 실시하였다. 이를 통해 훼손현상에 대한 석탑 부재의 약화정도를 비교할 수 있으며 실제 훼손상태에 따른 취약부분을 파악할 수 있다. 또한 육안관찰을 통해 알 수 없었던 부재의 내부적 결함을 확인하였다. 이 석탑의 방위별 평균 초음파 속도를 살펴본 결과, 동<남<북<서측면 순으로 나타났으며 동측면이 평균 2193(1599~2898) m/s로 가장 낮은 초음파 속도를 보였다. 이는 동측면이 다른 측면에 비해 부재의 물성약화가 진행된 것을 지시하는 것이다.

이를 근거로 산출한 부재의 평균 압축강도에서도 동

<남<북<서측면 순으로, 동측면이 234.9 kgf/cm³의 낮은 값을 나타냈다. 화강암질암의 압축강도는 장석류의 변질도와 깊은 관계를 갖는 것으로 압축강도가 상대적으로 낮은 수치를 보이는 것은 풍화에 의한 강도와 내구성의 약화에 의한 것을 의미한다.

평균 5,000 m/s의 극경암에 해당하는 신선한 암석의 초음파 속도를 기준으로 Iliev(1967)가 제안한 관계식에 적용하여 풍화도 지수를 산출하여 방위별 풍화등급을 살펴보았다. 이 결과, 전체적으로 0.52~0.56의 범위를 나타냈으며 평균 0.55로 풍화도 지수 분류에서는 HW(highly weathered) 등급의 심한 풍화단계에 속한다(Goodman, 1989; Suh *et al.*, 2002). 이 석탑의 방위별 입면도에 각 초음파 속도를 투영하여 전체적인 풍화도를 분석한 결과, 동측면에 저속대대가 넓게 분포되어 있었다. 이는 훼손지도 작성을 통해 분석된 결과와 일치하는 것으로 정량적 훼손도 평가의 신뢰도를 입증하는 결과이다.

5. 보존처리와 유지관리

5.1. 표면처리

청룡사삼층석탑의 표면풍화를 저감시키고 오염과 훼손으로부터 미연에 방지하여 장기적인 안정적 관리를 위해 보존처리와 주변정비를 수행하였다. 이 석탑은 지

대석과 기단부 및 옥개석 상부를 중심으로 조류, 지의류, 선태류 등이 다양한 산출상태를 보이며 서식하고 있다. 또한 기단부의 곳곳에는 황갈색 및 암흑색으로 변색되어 전반적으로 세심한 세정이 필요한 상태였다. 석탑표면의 세정은 석재에 손상이 가지 않도록 양모봇과 나무칼을 사용하여 1차로 건식세정을 실시하였다.

1차 건식세정은 2차 생물처리제를 이용한 화학세정의 효과를 증진하기 위하여 가급적 양모봇을 이용하여 불순물을 제거에 중점을 두었다(Fig. 8A). 일부 선태류 등은 시약의 흡수가 효과적으로 일어나도록 부분적으로 나무칼을 이용하여 제거하였다(Fig. 8B). 상대중석의 시멘트 몰탈 처리부분은 풍화작용에 의해 박락되고 변색된 상태이다. 이는 석탑 표면에 이차적 훼손을 일으키는 환경을 제공할 수 있으므로 치과용 소도구 및 작업공구를 이용하여 제거하였다(Fig. 8C). 석탑표면에 남아있는 먼지, 흙 등의 불순물은 증류수를 이용하여 세정하였다(Fig. 8D).

2차 화학세정은 석조문화재의 생물피해 방지를 위하여 석재 재질에 영향을 주지 않는 효과적인 살균처리 및 제거방안 연구를 근간으로(Chung *et al.*, 2003; 2005), 국립문화재연구소에서 연구결과를 발표한 처리제 중 4급 암모늄 화합물(Anti-Germ Solution)을 구입하여 처리하였다(Table 1). 100% 농도의 4급 암모늄을 소형분무기를 이용하여 석탑 표면이 충분히

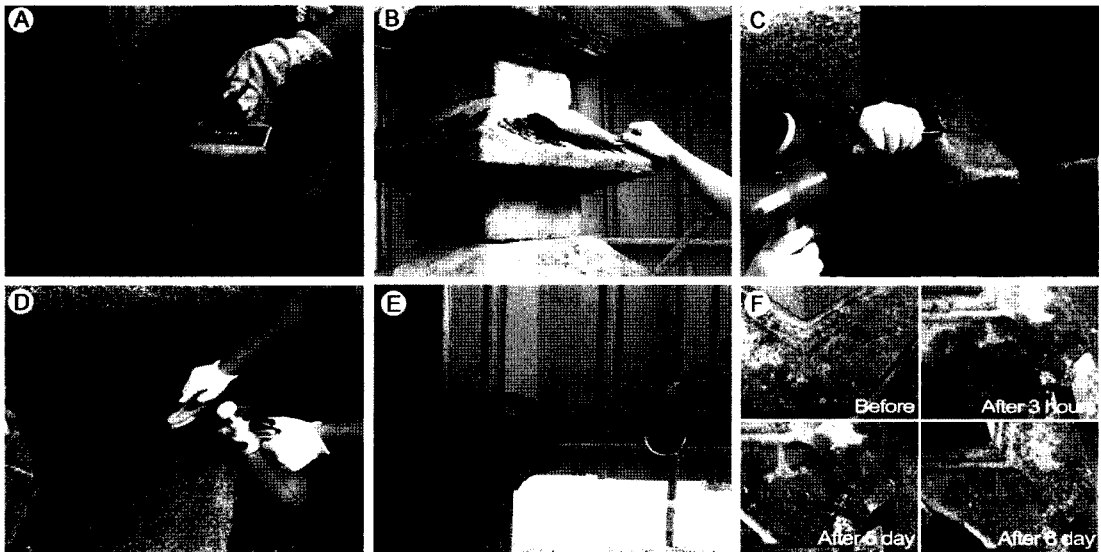


Fig. 8. Surface cleaning treatments of the stone pagoda. (A, B) Dry cleaning using brush and wood-knife. (C) Removing processes of degraded cement used dental and detail working tools. (D) Dust, soil and remnants on the stone surface are cleaned by distilled water. (E) Biocide spray on biospecies covered stone surface for field test. (F) Field observations for test and effects of biocide of temporary treatment on the stone surface.

Table 1. Active ingredients and treatment of the anti-germ solution made by Swiss Clean.

Biocide	Active ingredients	Treatment method
Anti-Germ Solution	quaternary ammonium compound 0.1%, alcohol	Spray on the surfaces from a distance of approximately 30cm

Table 2. Physical properties of the MC Nylon for reinforce materials of the stone pagoda.

Tensile strength (kg/mm ²)	670-840	Elongation(%)	10-70
Modulus of elasticity (k/c)	24-31	Coefficient of friction	0.35
Impact strength (kg/mm ²)	2-3	Thermal conductivity	5
Strain temperature (°C)	149-219	Heat-resistant temperature(°C)	121-149
Flame retardancy	anti-fire	Coefficient of thermal expansion	9

젓도록 분무처리 하였다. 화학세정작업은 효과적인 처리를 위해 1, 2차로 나누어 석탑전면에 걸쳐 실시하였으며, 1차 처리 이후 생물오염이 집중된 부분을 선정하여 처리효과를 확인하였다(Fig. 8E, 8F).

이 결과, 석재표면의 생물체들은 살생물제의 1차 분무를 실시한 후 2~3시간이 지나면서 급격한 변색이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 처리 3일 후부터는 부착생물종의 박리현상 진행이 관찰되었으며 처리 8일이 지난 후에는 생물종의 부식에 의한 곰팡이가 확인되었다. 간단한 처리효과 확인 후 이전보다 생물종의 부착력이 약화된 상태에서 전체적으로 부드러운 솔과 나무칼을 이용하여 세정을 실시하였다. 마지막으로 이 삼층석탑의 표면세정이 끝난 후에 효과적인 보존을 위해 생물처리제의 2차 분무를 실시하였다.

5.2. 집합 및 보강과 고색처리

이 석탑에서는 표면 박리박락, 균열, 탈락이 관찰되었다. 특히 탈락은 모서리를 중심으로 이뤄져 옥개석의 대부분은 부재의 일부가 결실되었고 기단부의 경우 부재가 탈락되어 이탈된 상태로 유실의 가능성을 내포하고 있다. 상대갑석의 북동쪽 모서리는 균열에 의한 부재의 탈락이 발생하여 시멘트 몰탈 처리하였다. 그러나 이는 문화재로서의 미관을 해치고 풍화되면서 석탑 표면의 변색이나 생물오염을 일으키는 환경을 제공할 수 있고, 구조적 문제를 가중시킬 수 있으므로 보수부분의 점검 및 재처리가 필요한 상황이었다.

시멘트 제거를 위해 치과용 소도구 및 작업공구를 이용하여 표면에 부식된 시멘트를 제거하였다. 이 부분에 부착되어 있는 시멘트의 잔량, 먼지, 흙 등 불순

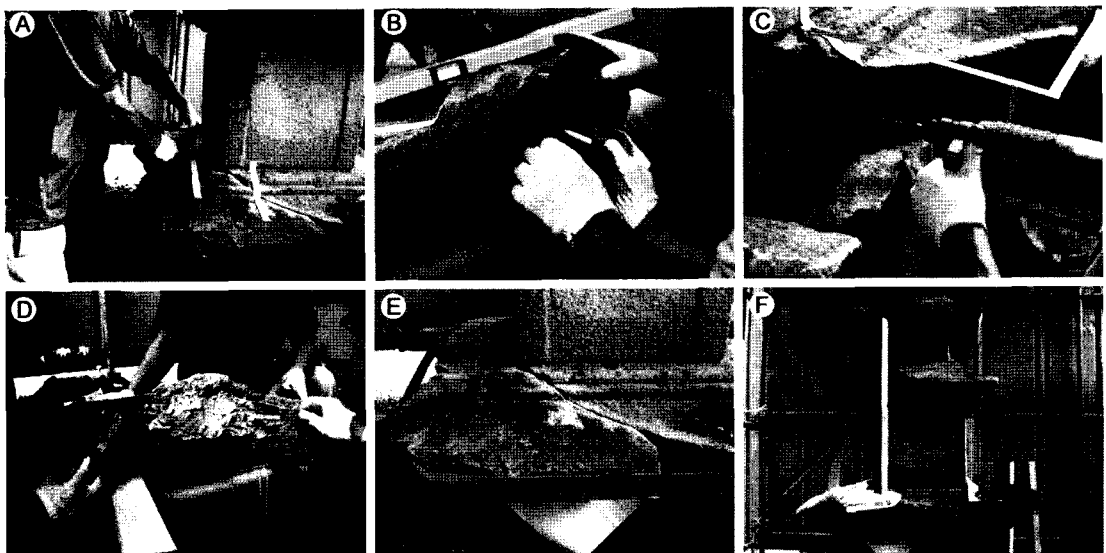


Fig. 9. Rejoining and reinforcement for the broken stone materials of the pagoda. (A, B) Chose position of reinforcement part using tape measure. (C) MC Nylon's fixing hole made using drill for rock. (D) Rejoining processes using epoxy resin. (E, F) Broken stone material is fixed by fixing rope and square ladders.

물은 증류수로 세정하여 제거하고 자연 건조하였다. 시멘트가 제거된 부재의 수지접합을 위해 보강재로 MC 나이론이 사용되었다. MC나이론의 일반명칭은 모노카스트나이론이며, 반응축매가 혼합된 나일론모노머를 급형에 주입하여 대기압에서 화학변화로 성형시킨 엔지니어링 플라스틱으로 일반압출나일론 제품에 비교하여 월등한 물성을 지니고 있다(Table 2). 또한 내마모성과 유연성이 좋기 때문에 석재보강재로 사용하였을 때 외부의 충격흡수에 뛰어난 강점이 있다(NK, 2007).

보강방법은 ‘ㄱ’자와 줄자를 이용하여 보강 부분의 위치를 설정하고(Fig. 9A, 9B) 직경 1.5cm 드릴을 사용하여 길이 15cm의 MC나이론 고정 홀을 만들어 에폭시 수지(상품명; L-30)에 충전제(활석)를 혼합하여 고정시켜 보강하였다(Fig. 9C, 9D). 보강부위의 완벽한 고정을 위해서 고정용 바를 이용하여 유지하였고 목재를 사용하여 부재의 변형을 최소화 시켰다(Fig. 9E, 9F). 이후 지대석의 탈락부위도 에폭시 수지를 사용하였으며 충전제로는 활석과 화강암 분말을 혼합하여 접합하였다. 이 삼층석탑의 탈락부위에 대한 수지접합이 완전히 경화된 다음 아크릴 불감액과 수채화물감을 이용하여 원부재와 이질감이 없도록 색맞춤을 하였다.

5.3. 강화처리 및 주변환경 정비

이 석탑에는 과거에 각종 부재의 수평을 맞추기 위

해 철판피임이 사용되었다. 그러나 일부는 수평을 저해시키고 대기환경과의 풍화작용을 통해 완전히 부식되어 석재주변을 암갈색으로 오염시키고 있다. 따라서 철판피임을 제거하고 클리노 컴퍼스와 수평바를 이용하여 수직과 수평을 측정하고, 자연환경에서도 강도 및 내식성이 뛰어난 티타늄 강철 합금으로 교체하였다(Fig. 10A, 10B).

내부의 모든 보존처리가 수행된 후 석탑의 부재가 충분히 건조되었을 때, 마무리 작업으로 강화처리를 실시하였다. 강화제는 최근까지 가장 효율적인 함성수지로 평가받는 에틸 실리케이트 계열의 Wacker OH 100을 선정하였다. 실제 처리에는 초음파 탐사결과를 고려하여 풍화가 심한 부재를 중심으로 집중 도포하였다. 이는 약화된 석재조직의 응집력을 회복시켜주고 석질을 강화하여 물의 침투로 발생될 수 있는 풍화나 손상을 지연시킬 것이다(Fig. 10C).

이 석탑의 모든 부재는 보존처리 전에 비하여 처리 효과와 필요성을 명확히 입증해 줄 수 있을 만큼 성공적인 처리과정을 거치게 되었다(Fig. 10D, 10E, 10F). 이와 같은 국내의 석조문화재에 대한 보존처리 결과는 이미 국제적으로도 우수성이 입증된 바 있다(Lee *et al.*, 2003; 2006b). 가설재의 해체는 석탑에 영향이 가지 않도록 수작업으로 철거하였다. 가설재의 해체가 끝난 후 주변정비를 실시하였으며, 석탑 주변

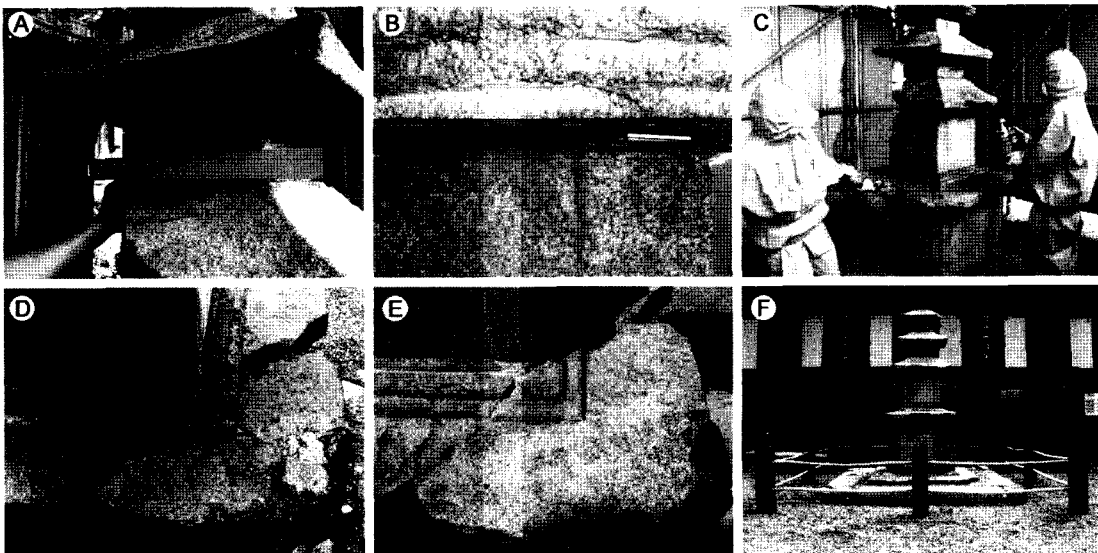


Fig. 10. Finishing processes of treatments and general field view of after conservation treatments of the stone pagoda. (A) Horizontality and verticality adjusted by clino-compass and horizontal bar. (B) Irregular piece of iron alternated by titanium stainless steels. (C) Spray a consolidant on the stone surface after treatments. (D, E) Comparison of broken roof stone showing before and after conservation treatments. (F) Frontal view of the stone pagoda after the conservation treatments in August 2006.

에 보호책을 만들었다. 또한 석탑주변 지반에 자갈로 보강하여 배수를 용이하게 조절하였으며, 향후 지의류 및 이끼류 발생을 억제토록 하였다. 현재 일차적인 보존처리가 완료되었으며 주변 환경도 완전히 정비되었다(Fig. 10F).

6. 결 론

1. 안성 청룡사삼층석탑의 구성암석은 조립에서 세립질의 편마상 복운모 화강암과 세립질 화강암이 대부분을 이루고 있으며, 부분적으로 화강암질 편마암, 안산암질암, 안구상 편마암을 혼용하였다. 아무런 보호시설 없이 야외에 있는 이 석탑은 곳곳에서 적갈색, 황갈색 암흑색 변색이 관찰되며, 기단부와 옥개석의 상부를 중심으로 지의류를 비롯한 다양한 생물이 서식하고 있다. 또한 부재의 탈락, 균열 등 물리적 및 기계적 풍화로 인하여 보존처리가 시급한 상태이다.

2. 요인별 훼손상태를 정밀진단하고 이를 바탕으로 종합훼손도를 작성한 결과, 기단부와 옥개석 상부가 무기오염물에 의한 변색과 생물학적 오염이 심각하여 암석의 재질을 약화시키고 있었다. 또한 곳곳에 발달한 균열과 모서리를 중심으로 나타나는 부재의 결실은 약화된 응력으로 인해 부재간 하중의 편달을 발생시켜 구조안정성을 위협한다. 이를 방위별로 분석한 결과, 동측면이 다른 측면에 비해 표면 오염물과 부재의 균열 및 박리박락과 탈락이 복합적으로 작용하여 집중적인 보존처리가 필요할 것으로 나타났다.

3. 종합훼손지도 작성을 통한 현장적 연구를 정량적으로 입증하기 위해 모든 부재의 초음파 속도를 측정하였다. 측정된 자료를 방위별로 분석한 결과, 동측면에서 1599~2898의 범위와 평균 2193의 수치를 나타냈다. 암석의 압축강도는 234.9 kgf/cm^2 로서 풍화도 지수를 산출하여 풍화등급을 산정한 결과 HW의 상당한 풍화단계에 속하는 것으로 나타났다. 이는 초음파 속도를 투영하여 도시한 전체적인 풍화도와 함께 정량적 훼손도 평가 자료로 이용되었다.

4. 이 삼층석탑의 정밀조사와 실내실험을 종합하여 정량적인 풍화훼손도를 진단하였고 이를 근거로 체계적인 보존처리하였다. 보존처리는 삼층석탑에 가설구조물을 설치한 후 먼저 표면세정을 실시하였다. 표면세정은 석재에 손상이 가지 않도록 1차 건식 세정을 수행하였고, 2차로 종류수와 생물처리제(4급 압모늄)를 이용하여 화학세정을 실시하였다. 생물처리제를 이용한 세정은 분무 후 1주일 정도 효과를 관찰한 후에

처리용 소도구를 이용하여 지의류 및 선태류 등을 제거하였다.

5. 처리제의 지속적인 활성화와 성공적으로 생물의 생장을 억제할 수 있도록 2차 분무를 실시하였다. 상대중석의 노화된 시멘트 접착부위는 처리용 공구를 이용하여 제거하였으며 지대석과 상대갑석의 탈락된 부분은 합성수지(L-30)를 이용하여 복원하였다. 또한 부재사이의 부식된 철판은 티타늄 강철 합금으로 교체하였다. 발수경화제는 Wacker OH 100을 사용하여 모든 공정이 완료 후 총 3회 분무식으로 도포하였다. 또한 이 삼층석탑의 기단주변을 정비하여 습기와 생물침해의 발생을 억제토록 조정하였다.

사 사

이 결과는 공주대학교 문화재진단보존기술연구사업단과 서진문화유산(주)이 공동으로 수행한 것이다. 이 연구는 국립문화재연구소의 연구개발사업인 “석조문화재 손상평가 기술개발”과 공주대학교 “Star Project”의 지원을 받아 완성되었음을 명기하며 각 기관의 행정 및 재정적 지원에 깊이 감사드린다. 또한 원고의 문제점과 보완점에 대하여 상세한 지적과 건설적인 비평을 해주신 양동윤 박사님과 엄정기 교수님께 깊이 감사한다.

참고문헌

- CHA (Cultural Heritage Administration in Korea) (2007) Detail description of Cheongryongsa Temple Stone Pagoda. www.ocp.go.kr.
- Chung, Y.J., Seo, M.S., Lee, K.S. and Han, S.H. (2003) The biodeterioration and conservation of stone historical monuments. *Conservation Studies*, v. 24, p. 5-28.
- Chung, Y.J., Seo, M.S., Lee, K.S. and Hwang, J.J. (2005) A study of cleaning on the biofilm of stone cultural properties. *Conservation Studies*, v. 26, p. 5-25.
- Fidler, J. (2002) Stone building, construction and associated component system: their decay and treatment. *English Heritage Research Transaction*, v. 2, p. 1-104.
- Fitzner, B. (2004) Documentation and evaluation of stone damage on monuments. *The 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Stockholm, Sweden, p. 677-690.
- Goodman, R.E. (1989) *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- Iliev, I.G. (1967) An attempt to measure the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. *Proceedings of the First International Congress, International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, v. 1, p. 109-114.

- Ishihara, S. (1998) Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic granitic belts. *Resource Geology*, v. 48, p. 219-224.
- Kang, P.J., Kim, W.Y. and Lee, J.H. (1980) Geological map of Jincheon Sheet in Korea (1:50,000). Korea Institute of Resources Development, 16p.
- Lee, C.H., Choi, S.W. and Suh, M. (2003) Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 21, p. 63-77.
- Lee, C.H., Kim, J. and Han, S.Y. (2005a) Material characteristics and provenance interpretation of the stone moulds for bronze artifacts from Galdong prehistoric site, Korea. *Journal of Munhwajae*, v. 38, p. 388-420.
- Lee, C.H., Lee, M.S. and Suh, M. (2005b) Safety interpretations of the discontinuity and weathering characteristics of the Gaheungri triple Buddha statue, Yeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 41, p. 401-413.
- Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W. (2005c) Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea. *Environmental Geology*, v. 47, p. 547-557.
- Lee, C.H., Choi, S.W., Lee, H.M. and Lee, M.S. (2006a) Archaeogeological implication of lithic artifacts from the Unjeonri Bronze Age site, Cheonan, Republic of Korea. *Journal of Archaeological Science*, v. 33, p. 335-348.
- Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J. (2006b) Deterioration assessment and conservation of heavily degraded Korean stone Buddha from the ninth century. *Studies in Conservation*, v. 51, p. 305-316.
- Lee, C.H., Kim, Y.T. and Lee, M.S. (2007) Provenance presumption for rock properties of the five-storied stone pagoda in the Jeongrimsaji temple site, Buyeo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 42, p. 183-196.
- Lee, C.H. and Yi, J.E. (2007) Weathering damage evaluation of rock properties in the Bunhwangsa temple stone pagoda, Gyeongju, Republic of Korea. *Environmental Geology*, v. 52, p. 1193-1205.
- Lee, D.S., Lee, C.H. and Kim, J. (2006c) Formation of efflorescence and dissolving experiments for removing control on the stone pagoda of the Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 39, p. 285-299.
- May, E., Lewis, F.J., Pereira, S., Seaward, M.R. and Allsopp, D. (1993) Microbial deterioration of building stone - a review. *Biodeterioration Abstracts*, v. 7, p. 109-123.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 1523-1534.
- NK (Nylon Korea) (2007) Material characteristics and physical properties of MC nylon. <http://www.mcnylon.com>.
- Suh, M., Song, I. and Choi, H.S. (2002) The structural safety diagnosis of Dabo pagoda of Bulkuk temple using analyses of ultrasonic wave velocity. *Journal of Korean Geophysical Society*, v. 5, p. 199-209.
- Uchida, E., Ogawa, Y. and Nakagawa, T. (1998) The stone materials of the Angkor monuments, Cambodia: the magnetic susceptibility and the orientation of the bedding along of the sandstone. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, v. 93, p. 411-426.
- Uchida, E., Cunin, O., Suda, C., Ueno, A. and Nakagawa, T. (2006) Consideration of the construction process and the sandstone quarries during the Angkor period based on the magnetic susceptibility. *Journal of Archaeological Science*, v. 33, p. 1-10.