경주 불국사 삼층석탑(석가탑)의 무기오염물과 보수물질 특성

이젬마 | 김사덕* | 박성철** | 김덕문¹

국립문화재연구소 안전방재연구실, *국립문화재연구소 복원기술연구실

**국립문화재연구소 건축문화재연구실

Characteristic of Inorganic Contaminants and Conservation Treatment Materials for the Three-Storied Stone Pagoda of Bulguksa Temple in Gyeongju

Gemma Lee | Sa Duk Kim* | Sungchul Park** | Derk Moon Kim¹

Department of Safety and Disaster Prevention, National Research Institute of
Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

*Department of Restoration Technology, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

**Department of Architectural Heritage, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

¹Corresponding Author: kimdmn@korea.kr, +82-42-860-9230

초록 경주 불국사 삼층석탑에서 발생한 무기오염물과 보수물질의 생성 원인 및 재질 특성을 규명하기 위해 분석을 실시하였다. 그 결과, 황색 오염물은 외부 기원 토양 또는 풍화토의 침착으로 인한 변색, 적갈색 오염물은 산화철 광물의 한 종류인 침철석(Goethite, FeOOH)에 의한 오염, 흑색 오염물은 망간(Mn) 산화물이 부재 표면에 고착되면서 암석의 색상 변화를 유발하는 것으로 확인되었다. 과거에 사용된 보수 재료 중 시멘트 모르타르는 외부 환경과 반응하여 백화 현상을 야기한 것으로 판단된다. 이를 통해 석탑 오염물질과 관련된 기초 자료를 확보하고, 효율적인 보존처리 방안 마련 자료로 활용하였다. 한편, 외부환경에 노출되어 있는 석탑은 오염물 재형성 가능성이 높으므로 지속적인 모니터링을 통한 체계적인 관리가 요구된다.

중심어: 경주불국사삼층석탑, 무기오염물, 변색, 보수물질, 재질분석

ABSTRACT Analyses of the three-storied stone pagoda at the Bulguksa temple in Gyeongju were carried out in order to identify the cause for material characteristics of inorganic contaminants and conservation treatment materials. Results indicated that foreign soil or weathering soil caused yellow discoloration of the pagoda, reddish-brown contaminants were formed by goethite (FeOOH), an iron oxide mineral, and black pollutants were formed by manganese (Mn) oxide, leading to discoloration of the rock. Among the restoration materials used in the past, cement mortar could cause whitening by reacting with the external environment. The results were used as basic standards to evaluate the material characteristics of the surface contaminants and identify a set of effective conservation treatments. Nevertheless, continuous monitoring is required, as there is a high possibility of regeneration of pollutants in the future because of the continuous exposure of the pagoda to the external environment.

Key Words: Three-Storeyed Stone Pagoda of Bulguksa temple in Gyeongju, Inorganic contaminants, Discoloration, Conservation treatment material, Material analysis

1. 서 론

천연 재료인 암석은 생산성이 좋고 내구성이 강할 뿐만 아니라 특유의 아름다움을 지녀 석조 건축물의 재료로 많이 사용되어 왔다. 특히, 조산운동을 많이 겪은 우리나라에서는 양질의 화강암이 전국적으로 고루 분포되어 있기 때문에 역사적, 문화적 목적에 맞는 다수의 석조문화재를 조성할 수 있었다. 그러나 전국에 산재해 있는 대부분의 석조문화재는 외부 환경에 노출되어 있으며, 여러 가지 표면 오염물에 의해 피해를 입고 있는 실정이다.

석조문화재 보존에 대한 연구 중, Sasse and Sneath (1997)에 의한 연구를 비롯한 풍화훼손 진단과 생물열화 등의 연구가 복원 현장에 적용되기 시작하면서(Lee *et al.*, 2003; Oh *et al.*, 2018), 이를 토대로 석조문화재의 과학적 보존에 대한 연구 성과가 다양하게 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2009; Kim and Do, 2009; Lee and Kim, 2015; Lee and Kim, 2015).

그 중에 신라 석탑의 전형을 보여주는 국보 제21호 경주 불국사 삼층석탑은 신라 시대의 석탑 예술과 기술을 집약한 역사적 산물이자 우리나라의 소중한 문화유산이다. 더

불어, 불교와 동양 전통 사상의 조화 속에서 우리 민족의 정신적, 문화적 정수를 보존하고 겨레의 자긍심을 일깨우는 상징으로 평가되고 있다. 이 석탑은 고려 현종 15년(1024), 정종 2년(1036)과 정종 4년(1038)에 해체·수리된 것으로 기록되어 있다. 특히, 조선 선조 20년경(1586) 낙뢰로 인해 상륜부의 본래 형상이 없어질 정도의 훼손이 발생하였으며, 이를 1972년경에 실상사 삼층석탑 기준으로 복원하였다고 전해진다. 1966년에는 도굴 및 균열로 인한 석탑의 안정성 논란으로 1층 옥개석 이상을 해체·수리하였고, 해체 중 2층 탑신에서 사리 및 사리장엄구 일체를 수습하기도 했다.

2010년 국립문화재연구소에서 실시한 석탑의 정기안전 점검을 통해 북동측 상층기단 갑석에서 길이 1.32 m, 최대 폭 5 mm 정도의 균열과 부재 절단이 확인되었다. 이러한 석탑의 훼손은 구조적 안정성까지 저해할 수 있는 심각한 문제로 대두되어 문화재위원회의 결정에 따라 2012년부터 2017년까지 석탑의 전면 해체 수리 복원을 실시하였다.

이 석탑은 오랜 기간 야외 환경에 위치한 관계로 물리적, 화학적, 생물학적 등의 풍화훼손이 상당히 진행된 상태였다. 그 중에 표면 오염물로 인한 풍화훼손도가 높아 이를

Figure 1. View of Three-Storeyed Stone Pagoda of Bulguksa temple in Gyeongju and the surface contaminants. (A) View of the pagoda, (B) Yellow discoloration, (C) Reddish brown discoloration, (D) Black discoloration, (E) Conservation treatment material.

제거하기 위한 적절한 해결책이 필요한 실정이었다. 이 논문에서는 경주 불국사 삼층석탑의 해체 수리 과정에서 진행한 무기오염물과 보수물질의 재질 특성에 관해 살펴보고자 한다. 이 연구가 석조문화재의 과학적 보존 연구를 위한 귀중한 자료로 활용될 수 있기를 기대하는 바이다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 경주 불국사 삼층석탑

경주 불국사 삼층석탑의 풍화훼손 조사를 통해 보존 상태와 풍화훼손 정도를 분별하였으며, 석탑에서 관찰되는

Figure 2. Location of samples for the Three-Storeyed Stone Pagoda of Bulguksa temple in Gyeongju. (A) BGY-01, (B) BGM-02, (C) BGM-03, (D) BGM-04, (E) BGM-05, (F) BGM-06, (G) BGB-07, (H) BGY-08, (I) BGM-09, (J) BGY-10, (K) BGR-11, (L) BGM-12.

대표적인 풍화훼손 요인을 대상으로 범례를 설정하였다. 균열, 절단, 이격 등을 포함하는 물리적 요인, 표면에 서식하는 생물군에 의한 생물학적 요인, 표면 풍화로 인해 생성된 다양한 변색과 같은 화학적 요인 등을 바탕으로 풍화훼손 지도를 작성하였다(Figure 2). 석탑의 면적 대비 훼손 요인들의 분포 양상을 살펴보면 대체로 중첩된 양상을 보이고 있다. 화학적 요인이 우세하며 생물학적 요인과 함께 복합적 양상이 관찰된다. 두 요인에 의한 표면 풍화는 단기적으로는 정형미가 뛰어난 석탑 자체의 형상을 모호하게 만들 뿐만 아니라 장기적으로 부재 내구성 저하에도 직·간접적인 영향을 줄 수 있기 때문에 적절한 제어가 필요하다.

해체된 석탑 부재에서 관찰되는 표면 변색은 주로 오염물로 인한 부재의 변색, 환경적 요인에 의한 광물산화, 생물학적 풍화 등의 복합적 훼손 양상을 보이고 있다. 그 중에 다수의 부재에서 관찰되는 산화로 인한 변색은 외부 물질로 인한 철 성분 산화와 암석 내에 포함된 광물 특성에 의한 산화대와 같은 오염물로 크게 두 가지 양상으로 나눌 수 있다. 결국 이러한 오염물은 석조문화재의 외형적인 미적 가치를 저하시킬 수 있다(Figure 1). 한편, 일부 부재에서는 과거의 보수 재료로 사용한 시멘트 모르타르와 고분자 수지로 보이는 흔적과 표면 변색, 깨짐 등이 진행되는 2차적인 훼손 과정까지 보이고 있었다(Figure 1E).

이 연구는 여러 가지 요인에 의한 풍화훼손 중에서 부재의 무기질 표면 오염물과 보수물질 분석을 중심으로 진행하였다. 탑신부와 기반부를 중심으로 관찰되는 황색, 적갈색, 흑색 계열의 오염물과 이전 보수 과정에서 사용된 보수

물질에 대한 재질 분석을 실시하였다. 탑신부에서는 북측 3층 옥개석, 남측 2층 탑신, 서측 1층 탑신의 황색 오염물, 동측 2층 탑신의 적갈색 오염물, 동측 2층 옥개석, 서측 2층 탑신의 보수 물질을 대상으로 시료를 채취하였다(Figure 1B, 1C). 이와 함께 기반부의 남동측 상층기단 갑석, 북서측 상층기단 갑석, 북서측 하층기단 갑석, 서측 중앙 지대석의 보수 물질과 북동측 및 북서측 적심 평석 모서리의 흑색 오염물을 확인하기 위해 미량의 시료를 수습하여 분석을 수행하였다(Figure 1D, 1E). 또한 시료의 함량이 충분하지 않은 서측 1층 탑신, 남측 2층 탑신, 동측 2층 옥개석을 제외하고 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 음이온 분석을 실시하였다.

2.2. 연구 방법

석탑 부재의 표면 오염물을 대상으로 표면 조직 분석, 화학 성분 분석 등과 같은 정성·정량 분석을 실시하여 풍화훼손 상태와 위험 가능성을 확인하였다. 각각의 분석은 육안 및 휴대용 디지털 실체현미경 관찰을 통해 분류하고 미소 채취하여 X-선회절분석(D/MAX-2500/PC, Rigaku, JPN), 주사전자현미경분석(Dual-Beam FIB Auriga, Carl Zeiss SMT, DEU), 이온크로마토그래피분석(Dionex ICS-1100 system, Thermo Fisher Scientific Inc., US)을 하였다(Figure 2). 사용 기기와 분석 조건은 다음과 같이 정리하였다.

휴대용 디지털 실체현미경(DG-2, Scalar, JPN)을 이용하여 60배와 200배의 배율로 사진 촬영을 하였으며, 현장

Table 1. Analytical result of the samples for surface contaminants(in order)

Sample No.	Location of samples	Result of samples
BGY-01	Yellow discoloration of east side of foundation of pagoda	Soil
BGM-02	Conservation treatment material for west side of foundation of pagoda	Cement mortar
BGM-03	Conservation treatment material for north side of foundation of pagoda	Cement mortar
BGM-04	Conservation treatment material for southeast side of cover stone of upper platform	Cement mortar
BGM-05	Conservation treatment material for northwest side of cover stone of upper platform	Resin, Stone powder
BGM-06	Conservation treatment material for northwest side of cover stone of lower platform	Cement mortar
BGB-07	Black discoloration of northeast and northwest side of inner foundation of pagoda	Manganese oxide
BGY-08	Yellow discoloration of west side of first story of pagoda body	Soil
BGM-09	Conservation treatment material for west side of second story of pagoda body	Cement mortar
BGY-10	Yellow discoloration of south side of second story of pagoda body	Soil
BGR-11	Reddish brown discoloration of east side of second story of pagoda body	Goethite
BGM-12	Conservation treatment material for east side of second story of pagoda roof	Resin, Stone powder

조사 과정에서는 표면 조직을 관찰하고 분류하였다. X-선 회절분석 방법으로는 오염물에 함유되어 있는 각 광물의 결정상을 동정하였다. 주사전자현미경으로 표면 오염물의 미세 조직을 분석 하였으며, 에너지 분산형 형광엑스선 분석기를 통해 표면 오염물의 미세 조직에서의 화학 성분을 조사하였다. 주사전자현미경(SEM) 분석은 가속전압 -15 kV,

작동거리 6.3 mm로 분석 조건이 설정된 집속이온빔형 전자현미경이다. 이온크로마토그래피분석(Dionex ICS-1100 system, Thermo Fisher Scientific Inc., US)은 염 성분 분석을 위해 실시하였으며, 대상 시료의 6가지 음이온(F, Cl, Br, NO₃, PO₄, SO₄)에 관한 정량분석을 실시하였다. 분석 조건은 유 입량(Flow rate) 1.2 mL/min, 전류(SRS Current) 24 mA 이다.

Figure 3. Microscope(Left) and SEM(Right) images of the samples. (A) BGY-01, (B) BGB-07, (C) BGR-11.

3. 연구 결과

3.1. 무기오염물 분석

부재의 표면에서 관찰되는 황색(BGY-01, BGY-08, BGY-10),

적갈색(BGR-11), 흑색(BGB-07) 등 변색 종류별 오염물을 미소 채취하여 성분 분석을 수행하고 광물학적으로 동정하였다(Table 1).

황색 오염물은 대다수의 부재에서 관찰되는 대표적인 표면 오염물이며 동측 중앙 지대석(BGY-01), 1층 탑신 서

Figure 4. Location(left) and results(right) of SEM-EDS Analysis. (A) BGY-01, (B) BGR-11, (C) BGB-07.

측면(BGY-08, 2층 탑신 남측면(BGY-10) 등 위치별 시료를 채취하여 SEM으로 비교 분석을 실시하였다. SEM을 이용하여 황색 오염물의 미세조직을 관찰한 결과 대체로 광물 표면에 고착된 형태로 나타났으며, 이를 토대로 고착 물질에 EDS정량분석을 실시하였다(Figure 4A). 그 결과 규소(Si), 알루미늄(Al), 나트륨(Na)이 공통적인 주요 성분으로

분석되었다. 그 외 성분으로는 BGY-01에서 칼륨(K), 칼슘(Ca), 철(Fe), 그리고 황(S) 성분, BGY-08에서 철(Fe) 성분, BGY-10에서 칼륨(K) 성분이 추가적으로 검출되었다. 이와 같은 성분들은 암석을 구성하는 조암 광물들 또는 풍화토 토양에 함유된 석영, 점토 광물 및 장석의 화학 성분과 동일하다. 시료량이 충분한 BGY-01에 대한 X-선회절분

Figure 5. Analytical results of X-ray diffraction patterns(XRD) for inorganic contaminants. (A) BGY-01, (B) BGB-07, (C) BGR-11.

석 결과에서는 암석의 주성분인 석영(Quartz), 조장석(Albite, 사장석 계열), 정장석(Orthoclase, 알칼리장석 계열), 그리고 각섬석(Hornblende) 등 원암의 주요 광물들이 동정되었다. 일부 저각에서는 중첩되어 분류가 어렵지만 풍화토 또는 충적토 토양에 함유되어 있는 광물의 회절 패턴이 부분적으로 나타나고 있다(Figure 5A). 따라서 황색 변색을 나타내는 표면 오염 물질은 토양의 침착에 의한 것으로 사료된다.

적갈색 오염물은 주요 부재에서 부분적으로 나타나는 것으로 부재 간 수평을 맞추기 위해 사용된 금속 고임편이 위치한 곳 혹은 그 주변부에 주로 나타나고 있다(Figure 1C). 2층 탑식 동측면에서 채취한 BGR-11의 미세조직을 관찰한 결과에서는 침상의 결정구조를 많이 가지고 있었다. EDS정량분석에서는 측정 부위에 따라 칼슘(Ca)과 황(S), 그리고 철(Fe)과 산소(O) 성분의 화학 성분이 검출되었다(Figure 4B). XRD분석에서는 수산화철의 한 종류인 Goethite(α -FeOOH)과 석영(Quartz), 자철석(Magnetite), 황산칼슘(CaSO_4)이 함유되어 있었다(Figure 5C). 이러한 양상은 과거 보수과정에서 사용한 철 고임편이 비 또는 공기 중의 수분과 접촉해 화학 반응을 일으키는 과정에서 적갈색 변색이 생성된 것으로 추정된다.

마지막으로 흑색 오염물은 일부 기반부 부재에서 고착물의 형태로 생성되어 있다. 적심부에 사용된 평석 부재에서 채취한 BGM-07를 이용해 분석한 결과, SEM 결과에서는 미정질 형태의 광물이 관찰되었고, EDS분석에서는 망간(Mn), 규소(Si), 알루미늄(Al), 철(Fe)과 같은 화학 성분이 검출되었다(Figure 3B, 4C). XRD 분석에서는 흑운모(Biotite), 석영(Quartz), 조장석(Albite), 미사장석(Microcline), 망간산화물(Manganese oxide)의 회절패턴을 확인하였다(Figure 5B). 흑색 오염물은 주로 하층기단 지대석을 중심으로 망간(Mn)의 산화물이 부재 재질의 특성과 외부 환경과의 반응에 의해 석탑 부재 표면에 강하게 침착되면서 흑색 변색을 유발한 것으로 사료된다.

3.2. 보수물질 추정 시료 분석

경주 불국사 삼층석탑은 여러 차례에 걸쳐 보수된 것으로 알려져 있으며, 이는 부재에서 관찰되는 보수 흔적으로도 처리부 확인이 가능하다. 과거에 사용된 보수 재료의 분석 결과에서는 시멘트 모르타르(BGM-02, BGM-03, BGM-04, BGM-06, BGM-09) 또는 수지 계열(BGM-05, BGM-12)의 물질이 확인되었다.

시멘트 모르타르 시료를 대상으로 SEM을 이용하여 미세조직을 관찰한 결과에서는 광물 입자를 둘러싸고 있는 물질이 확인되었으며 대체로 석영 입자를 둘러싸고 있는 형태를 보이고 있다(Figure 6A, 6B). EDS 분석 결과에서는 칼슘(Ca), 규소(Si), 알루미늄(Al)이 공통적인 주요 성분으로 나타났으며, BGM-03을 제외하고는 마그네슘(Mg) 성분이 검출되었다(Figure 6C). 또한 XRD분석에서는 석영(Quartz), 조장석(Albite), 미사장석(Microcline), 흑운모(Biotite), 각섬석(Hornblende), 방해석(Calcite)과 시멘트 화합물인 CA, CAS, CS가 주로 동정되었다(Figure 6D). 그 중에 BGM-04, BGM-06, BGM-09에서는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 광물이, BGM-09에서는 에트링자이트(Ettringite)가 특징적으로 확인되었다(Figure 6E). 결과적으로 BGM-02, BGM-03, BGM-04, BGM-06는 토양 광물의 결정상과 시멘트 화합물 및 수화반응생성물의 구성 성분이 동일하기 때문에 시멘트 모르타르인 것으로 해석된다. 이는 시멘트의 구성 광물인 규산칼슘(CS: Calcium Silicate)계 또는 알루미늄칼슘(CA: Calcium Aluminate)계 화합물의 수화반응 생성물에 의한 것으로 판단된다. 또한 시멘트 모르타르 보수재료를 사용한 처리부 주변에서는 백색 변색이 관찰된다. 이것은 모르타르 사용으로 인한 칼슘(Ca)의 용출과 재결정의 반복으로 인해 생성되는 화합물인 방해석(Calcite, CaCO_3) 또는 석고(Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 결정의 암석 표면 침착으로 인한 백화 현상이 아닌 것으로 사료된다. 즉, 이전 보수 과정에서 사용한 시멘트 모르타르를 석분 또는 모래와 물을 함께 혼합하여 반죽한 후 경화되는 과정에서 화학 반응에 의해 생성된 반응 생성물이 석탑 부재 암석의 표면에 침착되어 백색 변색을 야기한 것으로 판단된다. 반면에 BGM-09는 시멘트와 석분 등과 함께 골재를 혼합한 시멘트 모르타르로 확인되었다.

수지 계열의 보수 재료는 북서측 상층 기단 갑석의 시료 BGM-05와 2층 옥개석 동측면의 시료 BGM-12을 대상으로 분석하였다. SEM분석 결과, 두 시료에서 비정질 형태의 물질이 관찰되었으며, EDS 분석에서는 규소(Si), 알루미늄(Al), 나트륨(Na) 성분과 같은 광물 결정의 화학 성분이 공통적으로 검출되었다. 그러나 BGM-05에서는 탄소(C), 질소(N), 산소(O) 성분이 관찰되었고, BGM-12에서는 탄소(C)와 산소(O) 성분의 결합 물질 패턴 양상을 보이기 때문에 결정상 광물이 아닌 것이 포함된 것으로 판단된다. XRD분석 결과, BGM-05에서는 흑운모(Biotite), 녹니석(Clinocllore), 석영(Quartz), 조장석(Albite), 미사장석(Microcline)의 회절패턴이 확인되었으나 시멘트 화합물질은 확인되지 않았다(Figure 5D). 따라서 북서측 상층 기단 갑석의 경우에는

Figure 6. Analytical results of conservation treatment material. (A) Microscope image of BGM-04, (B) SEM image of BGM-04, (C) SEM-EDS result of BGM-09, (D) XRD result of BGM-04, (E) XRD result of BGM-09.

에폭시와 같은 고분자 수지를 석분과 혼합하여 만든 수지 모르타르이며, 2층 옥개석 동측면은 고분자 수지를 석분 또는 모래와 혼합한 형태의 수지계 모르타르인 것으로 판단된다. 또한 상호 성분이 부분적으로 차이를 보이는 것을 시기를 달리하여 처리했을 가능성이 높다.

3.3. 염 성분 분석

오염물 시료의 함량이 충분하지 않은 서측 1층 탑신(BGY-08), 남측 2층 탑신(BGY-10), 동측 2층 옥개석(BGM-12)을 제외한 시료를 대상으로 이온크로마토그래피(IC)를 이용한 음이온 분석을 실시하였다(Table 2). 분석 결과에서는 F,

Table 2. Analytical results of IC(in Table 1. order)

No. Anion	BGY-01	BGM-02	BGM-03	BGM-04	BGM-05	BGM-06	BGB-07	BGM-09	BGR-11
F	0.66	0.40	0.41	1.99	0.32	0.62	0.57	4.31	0.85
Cl	3.62	4.62	2.98	4.82	1.85	4.19	3.19	19.72	6.29
Br	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
NO ₃	1.96	2.71	2.28	2.64	nd	5.62	4.34	16.28	24.85
PO ₄	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SO ₄	5.84	15.29	10.20	12.67	3.78	25.92	15.21	23.70	32.69

(Unit : ppm)

Cl, NO₃, SO₄ 등이 검출되었다. 이 석탑은 과거 해체 수리 및 보존처리 과정에서 시멘트 모르타르를 사용한 흔적이 관찰된다. 그 보수과정 중에서 시멘트 모르타르의 직간접적인 영향으로 인해 황산염과 질산염이 발생한 것으로 판단된다. 특히 BGM-02, BGM-03, BGM-04, BGM-06, BGM-09에서 검출된 황산염의 경우에는 시멘트 모르타르에 구성된 규산칼슘, 알루미늄산칼슘, 황산칼슘이 오염물 생성에 영향을 미친 것으로 사료된다. 검출 함량의 차이는 각각의 시멘트 성분 혹은 혼합비율 차이로 인해 나타나는 것으로 판단된다. 결과적으로 분석에 나타난 규산칼슘(CS: Calcium silicate)계, 알루미늄산칼슘(CA: Calcium aluminate)계에 대한 뒷받침 증거로 볼 수 있다. 한편, 이 석탑의 시멘트 모르타르 사용 시기는 현존 자료의 부족으로 인해 그 시기를 명확하게 구분하기 힘든 실정이다. 이러한 측면에서 본다면 여러 환경적 요인에 의해 황산염(SO₄) 잔존 양의 차이가 있을 수 있지만 보존처리 과정에서 각각 다른 시멘트 모르타르를 사용하여 원론적인 구성 성분 차이로 인해 발생하는 변이라고 가정할 수 있다. 결국 보존처리 시기가 서로 다를 수 있으며 최소 1회 이상의 시기적 차이를 보일 수 있다는 해석 또한 배제할 수 없다. 현재 분석 자료에 있어 다소 근거가 부족한 부분은 있지만 향후 추가적인 연구를 통해 더욱 명확한 근거자료 확보가 필요하다.

4. 고찰 및 결론

경주 불국사 삼층석탑은 오랜 세월 동안 기후와 주변 환경 등에 영향을 받아온 탓에 대다수의 부재에서 풍화훼손 현상이 나타났다. 특히, 변색과 보수 물질 같은 표면 오염물 제거에 대한 적절한 해결책이 필요한 실정이었다. 이러한 오염물의 생성 원인과 재질 특성을 규명하기 위해 조사 및 분석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 보존처리 방안의

설정 자료로 활용하였다.

각각의 오염물을 동정한 결과, 탑신부를 중심으로 생성된 황색 오염물은 토양 고착에 의한 변색으로 석탑 건조 시 부재 간의 평형 조절에 사용되는 것으로 알려진 토양과 바람에 의해 이동된 외부 기원 토양이 고착된 것으로 판단된다. 다수의 부재에서 관찰되는 적갈색 오염물은 부재 수평을 맞추기 위해 사용된 금속 고임편이 위치한 곳 혹은 그 주변부에 대부분 나타나고 있다. 이는 산화철 광물의 한 종류인 침철석이 비 또는 공기 중의 수분, 금속편과 접촉해 화학반응을 일으키는 과정에서 생성된 것으로 해석된다. 게다가 망간(Mn)의 산화물이 부재 재질의 특성과 외부 환경 간 반응에 의해 석탑 부재 암석의 표면에 강하게 침착되면서 암석의 흑색 변화를 유발하였다. 과거 보수 과정에서는 시멘트 모르타르와 고분자 수지 재료를 사용하였으며, 그 중에 시멘트 모르타르는 물과 혼합하여 반죽한 후 경화되는 과정에서 화학 반응으로 생성된 반응 생성물이 석탑 부재 암석의 표면에 침착되어 백화 현상을 야기한 것으로 보인다. 또한, 이온크로마토그래피(IC) 음이온 분석을 통해 시멘트의 구성 광물에서 유래된 것으로 보이는 황산염(SO₄)과 질산염(NO₃)이 검출되기도 하였다. 특히 황산염(SO₄) 함량의 변이는 시멘트 성분 혹은 혼합 비율로 인해 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 차이는 석탑의 보존처리 과정에서 사용한 시멘트 모르타르의 사용 시기를 명확히 구분할 수 없다. 황산염(SO₄) 함량의 변이 결과는 사용된 시멘트 모르타르 제품의 원론적인 성분 차이로 인한 것을 배제할 수 없으며, 결과적으로 시멘트 모르타르를 사용한 보존처리는 최소 1회 이상으로 시기적 차이를 보일 수 있다는 것으로 유추 가능하다. 하지만 해석에 대한 분석 자료가 부족하므로 향후 추가적인 연구를 통해 근거 자료 확보가 가능할 것으로 판단된다. 고분자 수지 재료는 북서측 상층 기단 감석의 에폭시와 같은 고분자 수지를 석분과

혼합하여 만든 수지 모르타르와 2층 옥개석 동측면의 구분자 수지를 석분 또는 모래와 혼합한 형태의 수지계 모르타르 형태로 나타나고 있다. 혼합 형태가 부분적으로 차이를 보이는 것은 시기를 달리하여 처리했을 가능성을 시사하고 있다. 국가기록원의 자료에는 1980년경 에폭시 수지 활용 가능성에 대한 연구를 진행한 뒤 적절한 에폭시 수지를 사용하여 동측 2층 옥개석의 훼손부를 보존처리하고 부재가 없는 공간은 수지와 동질 석분을 혼합하여 처리했다는 기록이 있어서 이를 뒷받침하고 있다(NRICH, 2017).

이 연구를 통해 경주 불국사 삼층석탑의 표면에서 관찰되는 무기오염물과 보수물질의 형성 원인과 재질 특성을 확인하였다. 그 분석 결과를 바탕으로 보존처리 방안의 기초 자료로 활용하여 보존처리의 효율성을 높일 수 있었다. 황색 변색, 적갈색 변색, 흑색 변색을 발생시킨 오염물은 건식 및 습식 세척과 스팀세척처리 과정을 통해 그 오염 정도는 저감되었으나 향후에도 지속적으로 발생할 가능성이 높다. 그러나 백화 현상을 유발한 시멘트 모르타르는 해체 후 보존처리 과정에서 제거되었기 때문에 추후 재발생 가능성이 낮을 것으로 판단된다. 한편 야외 환경에 위치한 석탑은 다양한 요인에 노출되어 있기 때문에 향후 오염물 재형성 가능성이 높으므로 지속적인 모니터링과 보존 관리가 필요하다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소 건축문화재연구실의 중요석조문화재 수리복원 사업 연구과제의 일환으로 진행된 경주 불국사 삼층석탑의 보수 사업 및 세부 연구를 수행한 결과물이 포함되어 있습니다.

REFERENCES

- Kim, D.R. and Do, J.Y., 2009, Effect of talc content on the physical properties of the epoxy resins in conservation treatment of stone monument. *The Korean Society of Conservation Science For Cultural Properties*, 25(1), 77-86. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.D., Lee, M.S., Han, B.I., Lee, J.J. and Song, C.Y., 2009, Deterioration diagnosis and conservation treatment of the Jincheon Sagongnimaeyeoraepsang : Stone Relief of Standing Buddha in Sagok-ri, *The Korean Society of Conservation Science For Cultural Properties*, 3(2), 323-333. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Lee, M.S., Seo, M.C. and Choi, S.W., 2003, Conservational scientific diagnosis and petrological characteristics of the Dabotap pagoda in the Bulguksa temple Korea. *The Geological Society of Korea*, 39(3), 319-335. (in Korean with English abstract)
- Lee, D.S. and Kim, H.Y., 2015, A study on structural reinforcement suitable for the weathering properties of stone cultural heritage. 31(4), 477-488. (in Korean with English abstract)
- Lee, G.M. and Kim, S.D., 2015, Weathering damage and conservation treatment of Three-Storeyed Stone Pagoda of Bulguksa temple in Gyeongju. *International Academic Symposium on Repair and Conservation Management of Stone Cultural Heritage*, Seoul, November 11-12, 74-93. (in Korean with English)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2017, Restoration for the Three-Storeyed Stone Pagoda of Bulguksa temple in Gyeongju, 1, 192-205. (in Korean)
- Oh, J.H., Kim S.D., Lee C.H. and Lee T.J., 2018, Characterization of surface deterioration for stone property around the Hyeonleung(royal tomb of Joseon dynasty) in Guri, Korea. *Journal of Conservation Science*, 32(3), 353-364. (in Korean with English abstract)
- Price, C.A. and Doehne, E., 2011, *Stone conservation : An overview of current research*. Getty Conservation Institute, 2-26.
- Sasse, H.R. and Snethlage, R., 1996, Saving our architectural heritage : the conservation of historic stone structures, *Conference papers of the Dahlem Workshop on Saving our Architectural Heritage*, Berlin, March 3-8, 223-243. (in English)