

익산 미륵사지 석탑의 백화현상과 제어를 위한 용출실험

이동식 | 이찬희* | 김사덕**

국립문화재연구소 미륵사지석탑보수정비사업단

*공주대학교 문화재보존과학과

**국립문화재연구소 보존과학연구실

Formation of Efflorescence and Dissolving Experiments for Removing Control on the Stone Pagoda of the Mireuksaji Temple Site, Iksan, Korea

Lee Dong-Sik | Lee Chan-Hee* | Kim Sa-Dug**

Iksan Mireuksaji Stone Pagoda Conservation Team, National Research Institute of Cultural Properties, Iksan 570-911, Korea

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

**Division of Conservation Science, National Research Institute for Cultural Properties, Daejeon 305-380, Korea

*Corresponding Author : 041-850-8543, chanlee@kongju.ac.kr

초록 익산 미륵사지 석탑은 백제 무왕대에 창건되어 몇 차례 수리 및 개축작업을 하면서 현 상태를 유지해 왔으나 최근에 구조적인 불균형이 심화되어 탑의 원형에 따른 보존과학적 수복을 위해 해체중이다. 이 탑의 원형은 평면방형탑으로 9층으로 추정되나 최근까지 일부 6층까지만 남아 있었다. 붕괴되어 망실된 부분은 1915년 일본인들이 콘크리트를 이용하여 불안전 탑의 형태를 고정시켜 놓았다. 현재 암석의 표면에는 침전물질이 피착되어 백화현상을 유발하였고 이로 인해 원암의 조직과 색상이 훼손되어 있다. 따라서 표면에 피착된 이차적 무기 오염물질의 종류와 산출상태 및 오염종을 정량분석하였다. 또한 용해실험을 통해 가용성 오염종을 규명하고 이에 대한 오염물질을 세정하는데 필요한 조건을 제시하였다. 이 결과는 석조문화재 표면의 무기오염종을 정량적으로 규명할 수 있는 자료를 제공할 것이며, 백화현상을 제어 할 수 있는 표면 세정제의 보존과학적 적용에 기여할 것이다.

중심어 : 콘크리트, 백화현상, 용해실험, 세정제

ABSTRACT The Mireuksaji stone pagoda of the Iksan was built in Muwang King of Baekjae Kingdom and has maintained its present status through several rebuilding process. Recently, the structural unbalance of the pagoda has worsened, so for scientific maintenance recovery of its original pagoda form, the pagoda is under dismantling process. The original form of this pagoda is being presumed to be a plane square pagoda of nine stories, though only a portion of six stories remains until today. The destroyed part from collapse was fixed in insecure pagoda form by Japanese in year of 1915. On the surface of the stone which has gone through the present time, efflorescence appeared as precipitation substance over crusted and due to this phenomenon, the structure and color of thee original stone haven't been preserved. Therefore, quantitative analysis on its kind, emitted status and contamination type of secondary inorganic contamination substance of the over crusted surface were analyzed. Also through reaction experiments, contamination type was defined and tests have been applied to find the requirements that will wash out the contaminants. The result of this study will provide the base of quantitative analysis on the kind of inorganic contamination of the surface of stone assets, and it shall also contribute to the application of scientific maintenance recovery of surface cleaner for efflorescence.

Key word : Concrete, Efflorescence, Reaction experiment, Cleaner

1. 서론

익산 미륵사는 백제무왕대(AD 600~641)에 미륵하생신앙을 기반으로 한 호국사찰로 3탑 3금당의 가람배치로 창건되었다. 그러나 백제가 멸망하면서 목탑과 강당 등 주요건물이 소실된 채 유지되다가 고려시대에 호국불교와 더불어 중창되었다. 사찰은 중원과 서원을 중심으로 운영되었지만 조선시대에 접어들면서 중심축이 서원의 북쪽으로 이동하였다. 그러나 조선의 억불정책에 의해 불교가 정체되면서 임진왜란을 전후로 미륵사는 사찰로서의 기능을 상실한 것으로 전해진다.¹

현재의 미륵사지는 사적 제150호로 지정되어 있고 유구로는 국보 제11호 석탑과 보물 제236호인 당간지주 2기와 도지정 문화재 자료 제143호 석등하대석 2기 그리고 각종 유물들이 보존되어 있다. 이중 석탑은 동양 최대의 탑으로 현재 6층 일부까지만 남아 있다. 전자에서 설명된 것과 같이 시대를 거치면서 문화를 정립하는 과정에서 석탑 또한 수리 및 개축이 이루어져 왔다. 정확한 탑의 변형시점은 알 수 없으나 해체 이전의 상태는 최근에 보강한 것으로 일제강점기(1915) 때 일본인들이 콘

크리트로 보수하였다(Figure 1).

타설된 콘크리트 내에는 포틀랜드 시멘트, 잡석, 모래, 혼화제 등을 배합하여 사용하였다. 탑의 변형을 막기 위해 사용된 콘크리트는 반파된 부분 외에도 부재 이격부이나 결실된 부분 및 성형처리 부분에 충전형태로 무분별하게 사용되었다. 따라서 콘크리트 활용범위 안의 부재 표면에는 회백색석출물이 피각된 상태로 원암의 조직과 색상이 보존되어 있지 않다. 특히 혼화제로 사용된 생석회는 백화현상을 유발하는 직접적인 원인물질로 용해되지 않은 강회 결정체가 남아 있다(Figure 2). 이 석회잔류물은 콘크리트의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

이 연구에서는 미륵사지 석탑의 부재 표면에 피각된 석회잔류물의 유해정도를 분석하였고 용해실험을 통해 가용성 오염종을 규명하였다. 또한 세정제에 대한 세정 방법 및 세정효과를 통해서 미륵사지 탑의 보존과학적 적용성을 알아보고자 하였다. 이 결과는 석조문화재의 백화를 저감할 수 있는 방지책을 사전에 마련하여 보존 수복을 하는데 기초 자료로 활용하고자 한다.

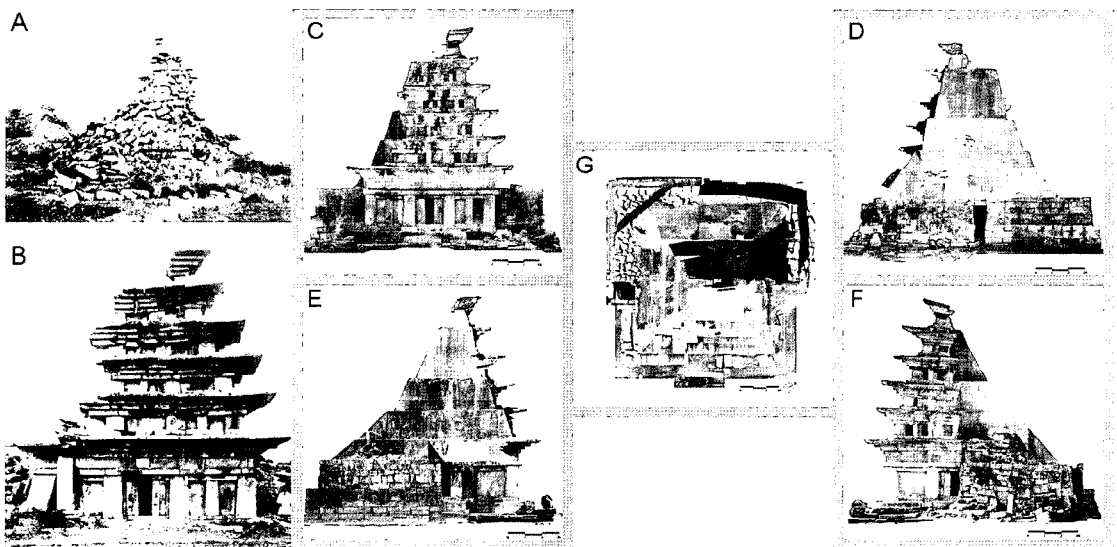


Figure 1. Photographs of the remaining the 6th-storied stone pagoda after collapse and before or after the concrete maintenance in year 1915 of the Mireuksaji temple site. (A) Dorsal view of the west side where the partial stone line have recollapsed even after being mended through stonework. (B) Frontal view of the east side where the south side have been extremely collapsed. (C, D, E, F, G) The present view of east, west, south, north side and plane after maintained with concrete.

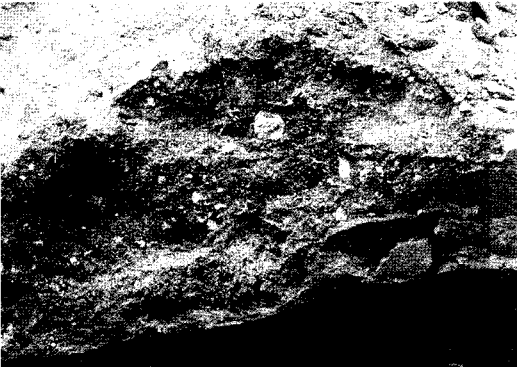


Figure 2. Quicklime compound used reconstruction for rock properties of the stone pagoda in the Mireuksaji temple site.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 지리적 위치 및 현황

미륵사지는 행정구역상 전라북도 익산시 금마면 기양리에 속하고 금마면에서 함열 및 황등 방향으로 약 3km 정도 떨어진 곳에 위치하고 있다. 이 지역은 해발 428m의 미륵산 남쪽에 위치하며 동서에 낮은 구릉지대를 끼고 있다.² 미륵산은 노령산맥의 한 지류에 속하고 지질학적으로 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이 주류를 이루고 있다. 탑을 구성하는 암석 또한 미륵산 주변에서 채석하여 조립한 암석으로 이루어져 있다.³

현재 사적으로 지정된 면적은 13,380m²이고 발굴은 1996년부터 시작되었으나 체계적인 발굴은 1980년부터 국립부여문화재연구소에 의해 3단계로 실시하여 1995년에 발굴조사를 마무리하였다.⁴ 이 연구의 대상인 석탑은 반파되어 일정 부분만 남아 있는 6층 형태로 유지하고 있으나 『東國輿地勝覽』의 문헌을 보면 동방에서 가장 큰 탑으로 알려져 있다. 높이는 지표상의 지대석을 기준으로 14.163m이다.

이 석탑은 동측면을 제외한 세면이 붕괴된 상태에서 일본인들이 시멘트로 덧발라 보수하여 현존하고 있다. 현재 남아 있는 탑의 형태는 평면방형탑으로 목조건축을 충실히 이행하였고 1층에는 4방위 모서리에 석주를 세우고 각 면은 3칸으로 이루어져 있다.⁵ 또한 중간에 사방에서 들어갈 수 있는 십자통로가 있고 그 중심에 방형석주가 세워져 있다. 문설주 위쪽으로는 창방, 평방, 포벽이 가로놓여 있고 포벽 위에 목조건물에서 공포에 해당

하는 3단 받침석이 옥개석을 받치고 있다.

2층 이상부터는 창방, 평방, 포벽이 생략되고 면석과 기둥을 아주 짧게 하여 전체적으로 안정감이 들도록 층고를 조절하였다. 각 층의 높이는 전체적으로 비슷하나 2)5)3)6)4층 순이고 대체적으로 체감비율을 맞추기 위해 탑신 받침석을 4층부터 2중 기단으로 가공하였으며 하옥개받침석은 5층부터 2단 내밀기 형태로 가공되었다.⁶ 옥개석은 넓고 얇게 가공되었고 네 귀퉁이 부분은 약간 하늘로 치켜 올려보이도록 치석하였다.

이러한 수법으로 가공한 이유는 상층의 옥개석 처마 끝에서 일률적으로 낙수되지 않도록 젖음성을 좋게 하였다. 즉 낙수 물이 한곳에 집중적으로 떨어지면 상층의 옥개석 라인과 일치된 하층의 옥개석 상면에 흠이 패여 결국 파손되어 이탈될 수 있을 것이다. 현재 해제된 부재의 표면에는 이러한 현상을 보이는 부재는 없는 것으로 조사되었다. 탑신부에 해당되는 기둥과 면석 또한 층고에 비례하여 가공되었고 특히 면석은 위면과 바닥면을 예각 처리하여 안으로 경사지게 치석하는 수법을 사용한 동시에 기둥 중간에 모접기를 하여 바깥방향으로 면석이 밀리지 않도록 정교하게 고정하였다.

2.2. 연구방법

해체중인 탑 부재나 이미 해제된 부재를 정밀 관찰한 결과, 석탑의 층위와 위치별로 오염 형태는 거의 비슷하였으나 오염 범위는 다소 차이가 있다. 따라서 이 연구에서 시험편으로 사용할 부재는 대표성을 갖도록 선택하였다. 그러나 문화재란 특수성 때문에 모재를 채취하여 사용할 수는 없는 상황이어서 절단이나 파손된 부재편으로 이탈된 부분을 수습하였다.

이 암석의 주성분, 미량 및 희토류원소의 화학분석은 X-선 형광분석기(XRF), 유도결합 아르곤 플라즈마 질량분석기(ICP-AES, ICP-MS)와 중성자 활성분석기(INNA)를 이용하여 원소를 정량분석 하였다. 또한 시료의 광학적인 성질을 조사하기 위해 편광현미경과 전자현미경(SEM)을 이용하였다. 조암광물의 상대적 함량비는 각각의 암석에 관한 박편을 대상으로 전통적인 방법에 따라 모드분석을 실시하였고, 모드조성은 자동계수가 장착된 Leitz사 모델의 Orthoplan(071948) 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다.

전자현미경 모델은 LINK사의 에너지 분산형 X-선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimadzu사의 SIS-SX-40이다. 분석 시료는 탄소와 금으로 이중 피복하여 이용하였다. 또한 조암광물의 정확한 동정을 위하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIB였고, X-선은 $CuK\alpha$ 에 조건은 30kV와 15mA였다. 회절선은 2θ 를 3° 에서 60° 까지 2° /분으로 회절시켜 구하였다.

부재의 표면에 침착된 수용성 오염물질을 분석하기 위해 채취된 시료를 박편으로 만들어 토양환경보전법상의 표준공정시험법에 의해 1시간 동안 교반한 후 30분 정도 침전시켜 채수한 시료를 대상으로 음이온과 양이온을 분석하였다. 박편은 각각의 용매에 1/2, 1, 2, 3, 5시간 함침하여 채수하였다. 이때 사용된 용매는 pH 6.2의 증류수와 증류수에 염산을 첨가하여 제조한 pH 5.0의 수용액이다. 이 pH 6.2 증류수는 석조문화재의 습식세정에 사용하는 일반적인 증류수이며, pH 5.0의 수용액을 선택한 이유는 산성비 중에서도 석조물의 표면 침식을 야기할 수 있는 것으로 알려진 pH이기 때문이다. 양이온 측정시료는 합성수지 병에 담아 분석이 진행되는 동안 냉장 보관하였고 전 처리는 용기에 금속이온이 흡착되는 것을 방지하기 위해 6N 질산(HNO_3)을 1ml 적정하여 산도를 유지하였다.

용존 양이온 분석기기는 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Production: Perkin-Elmer, Elan 6000)이고 아르곤 가스를 이용하여 10,000K 정도의 온도에서 생성된 플라즈마에서 방출되는 양이온들을 질량분석기를 통해 정량적으로 분석하였다. 용매 내의 용존 음이온은 이온크로마토그래프(IC, Production: Waters Corporate Headquarters, Waters 2690) 기기를 이용하여 분석하였고 분석 값에 대한 신뢰도와 재현성을 검증하기 위해 표준시료, 공시료 및 중복시료를 이용하여 분석치의 정확성을 높이고 오차를 줄였다.

3. 연구결과

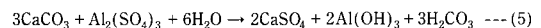
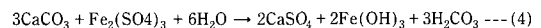
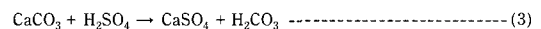
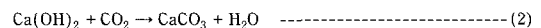
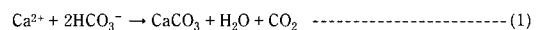
3.1. 산출상태 및 진단

불타의 사리를 봉안하는 불탑은 목탑, 석탑, 전탑, 벽

돌로 구성되어 있고, 현재 주로 남아 있는 것은 초기 목탑과 전탑에서 발전된 석탑이 주류를 이루고 있다. 그 중 우리나라에서 가장 대표적인 석탑이 익산 미륵사지 내에 존립하고 있다. 이는 목조 번안된 최초의 시원탑으로 국보 제11호로 지정된 석탑으로서 공식적인 명칭은 서탑을 지칭한다. 그러나 이 석탑 또한 여러 번의 변형과정을 거치는 동안 원형을 잃어버린 채 6층 일부까지만 남아 있었고 부재 표면은 자연적 또는 인위적으로 상당히 훼손되어진 상태다.

최근 일제 강점기 때 도괴를 방지하기 위해 콘크리트를 타설하여 고정시켜 놓았으나 90년이 지난 현재 보존 측면에서 상당한 병폐가 노출되고 있다. 임상실험 없이 서구의 방식을 모방하여 문화재에 적용한 콘크리트는 직접적으로 풍화 과정 중에 있는 암석 표면과 결합되면서 광물조직을 반복적으로 이완시키는 입상 분해로 결국 부분적인 파손에 이르게 되었다. 또한 콘크리트에서 석출되는 백화현상은 수산화석회($Ca(OH)_2$)가 탄산가스 등과 작용하여 석회석으로 변하여 부재 표면에 피각된 것으로 탄산염 광물로 노출된다.

이 탑에 나타난 대표적인 표면오염 물질의 산출상태를 보면 구성암체 맞닿면에 줄눈제와 같이 시멘트를 덧 바른 부분에서 회백색의 변층이 있는데 주로 외면석 표면에서 발생하는 현상이다(Figure 3A). 적심석에서는 콘크리트가 경화되면서 물과 함께 한쪽 부분으로 계속적으로 유입되면서 수분은 증발하고 석회잔류물만 부재 표면에 피각되어 부식을 촉진하는 과정에서 표면 유실을 가져온다(Figure 3B). 이러한 현상을 반응식으로 나타내면 아래와 같다.



콘크리트가 경화된 후에도 지속적으로 우수가 유입되어 유리된 탄산염을 방출하여 중유판이나 중유석처럼 성장한 부재도 있다. 특히 콘크리트 양생을 개량하기 위해 사용된 혼화제(생석회)로 인해 백화현상이 심화되었다(Figure 3C). 백색이나 회색 변층의 범위는 수분의 유동혼전에 따라 생성된 탄산염 형태로 나타나고 있으며 얼룩진 백화현상으로 인해 풍화를 촉진시키거나 심미적



Figure 3. The production status of efflorescence caused by cement. (A) Transformed layer of ash color caused by cement through material. (B) White phenomenon caused by using excessive mixture. (C) Remaining material of lime grown like a stalactite.

요인이 상쇄되고 있다.

3.2. 암석 및 광물학적 특징

이 탑은 미륵산 주변에서 석재를 채석하여 일정한 형태로 가공하여 조적조 기구식으로 쌓았고 부재 사이에는 접착제를 사용하지 않고 거칠게 치석하여 슬라이딩 되는 것을 방지하였다. 따라서 육안으로 보이는 면은 정다듬 되어 있는 반면에 보이지 않는 부재와의 맞닿면은 거친 정다듬하여 이탈을 방지하였다. 그러나 구조적인 불균형으로 인해 붕괴되면서 많은 부재가 파손되었다. 따라서 석재의 정확한 감정을 위해 모재에서 이탈된 부재편을 이용하여 암석 및 광물학적 특성을 살펴보았다.

조암광물의 변질특성을 관찰한 결과, 대부분의 조암 광물은 등립질 입상조직을 갖는 석영, 사장석, 정장석 및 흑운모로 구성되었고 장석류는 성장누대조직, 쌍정 또는 입자 경계를 따라 이차적으로 변질되어 점토광물화 작용을 받았다. 흑운모는 벽개면을 따라 철-망간 수산화물과 녹니석으로 교대되어 있다. 일부 탄산염에 노출된 조암

광물의 풍화정도를 관찰한 결과, 표면에만 국한적으로 영향을 주었을 뿐 광물 내부조직까지 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 세리에이트 조직을 보이는 석영과 취반상 조직을 갖는 장석류가 흑운모와 함께 입상조직을 이루고 있으며, 사장석과 정장석의 경계는 이차적인 성장교대조직과 점토광물화 작용을 받았다. 또한 흑운모도 벽개면을 따라 녹니석과 철산화물로 변질되어 있다 (Figure 4A, B).

표면에 피각된 백화오염물질의 원인을 규명하기 위해 석회질 광물이 심하게 피복되어 풍화현상을 보이는 부분을 대표시료로 선정하여 주사전자현미경(SEM)으로 생성물질의 미세조직을 관찰하였다. 이 결과 표면에 피복된 비정질 석회질 잔류물의 집합체는 입도와 산상이 아주 불균질하고 장석의 표면은 차별된 용해로 불규칙한 요철이 관찰되며 운모와의 접촉부에서는 이차광물이 생성되었다. 흑운모의 판상결정은 불규칙한 층상과 부분적으로 변질된 녹니석과 교대되어 있다(Figure 4C). 이 암석에 대한 광물의 종류와 상대적 함량비를 알아보기 위해 X-선 회절분석을 한 결과 석영, 정장석, 사장석, 운



Figure 4. Microphotographs showing rock properties of the stone pagoda in the Mireuksai temple site. Micrographic texture and rock forming minerals of quartz, orthoclase, plagioclase and biotite (A, B). Scanning electron microphotograph (SEM) of book textured biotite partly alter to the chlorite (C).

모, 감섬석 등이 동정되었다.

조암광물을 성분 분석한 결과, 석회질암으로 인해 훼손되는 정도는 그리 크지 않았으나 다른 오염물과 상충하는 복합반응을 하면 더 큰 피해를 가져올 것이다. 특히 화강암은 다른 암석들보다 기본물성이 우수하기 때문에 풍화도가 낮게 나타난다. 그러나 부재로 이용된 원암은 장기간의 풍화 과정을 거치면서 직간접적으로 손상을 받아 보다 빠른 분해과정을 수반하면서 광물조직을 변형시킨다.

3.3. 지구화학적 특징

암석의 화학적 풍화작용을 수반하는 요인은 아주 다양하나 대부분은 서로 복합적으로 작용하여 암석의 구성 성분과 성질 및 조직을 파괴한다. 특히 미륵사지 석탑에 사용된 화강암류의 풍화는 쌍정과 벽개가 잘 발달된 장석과 운모류의 변질로부터 시작된다. 원소 분석을 실시하기 위해 이탈된 부재편을 이용하였다. 일반적으로 풍화환경에서 원소의 상대적인 거동을 표현하기 위해 흔히 Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 중의 하나를 고정성분으로 사용한다.⁷ 그러나 석탑 부재표면에 점토광물이나 산화철 광물들이 생성되어 있어 이들을 고정성분으로 원소의 거동을 설명하기는 어렵다.

Table 1은 전암 시료의 주성분 원소의 화학분석 결과이다. 먼저 기준암석과 상대적인 부화 결핍 정도를 알아본 결과 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 는 부화되어 있으며 SiO_2 , MnO , K_2O 는 결핍되어 있다. 이 결핍원소들은 암석의 풍화작용에 의해 소실된 것으로 설명할 수 있는 반면에 부화된 원소들은 화학반응에 의해 이차적인 무기물이 생성되었거나 표면에 오염물이 피착된 것으로 판단된다. 특히 CaO 성분이 아주 높게 부화되어 있었는데 이는 콘크리트 타설시 혼화제로 사용된 생석회 영향으로 인한 것이다.

이 암석들의 일부 미량 및 희토류 원소를 분석한 결과, 일반적인 화성암과 거의 비슷한 함량변화를 가지고 있다. 그러나 이 자료를 토대로 암석학적 및 지구화학적으로 암석의 기원과 진화경향을 설명하는 것은 큰 의미가 없을 것이다. 부화경향을 살펴보면 동일 종류의 화성암에 비하여 Sr, Y, Cr, Ni 등의 원소들은 부화되어 있고 Be, Co, Cu, Hf, Pb, Sc, V, Zn, Zr 등은 결핍되어

Table 1. Concentration of major (wt.%), minor and rare earth elements (ppm) for the host rock of the stone pagoda in the Mireuksaji temple site.

| No. | MRS-1 | MRS-2 | MRS-3 |
|-----------|-------|-------|-------|
| SiO_2 | 64.15 | 66.60 | 74.90 |
| Al_2O_3 | 13.33 | 15.34 | 13.17 |
| Fe_2O_3 | 1.72 | 2.16 | 0.57 |
| MnO | 0.02 | 0.03 | 0.01 |
| MgO | 0.35 | 0.46 | 0.02 |
| CaO | 7.27 | 3.65 | 1.43 |
| Na_2O | 3.52 | 3.79 | 3.89 |
| K_2O | 4.05 | 4.66 | 5.02 |
| TiO_2 | 0.27 | 0.37 | 0.04 |
| P_2O_5 | 0.10 | 0.12 | 0.02 |
| LOI | 4.95 | 2.24 | 0.99 |
| Total | 99.74 | 99.42 | 100.0 |
| CIA* | 47.32 | 55.90 | 56.02 |
| WPI** | 6.56 | 5.86 | 4.39 |
| Ba | 858 | 1230 | 25 |
| Be | 3 | 3 | 3 |
| Cd | <0.3 | <0.3 | 0.5 |
| Co | 6 | 5 | 2 |
| Cr | 489 | 299 | 211 |
| Cs | 5.8 | 4.3 | 4.3 |
| Cu | 9 | 4 | <1 |
| Hf | 3.7 | 4.6 | 3.1 |
| Ni | 217 | 134 | 103 |
| Pb | 23 | 25 | 32 |
| Rb | 189 | 167 | 226 |
| S | 10 | 10 | 10 |
| Sc | 1.7 | 2.1 | 0.5 |
| Sr | 546 | 515 | 107 |
| Th | 9.40 | 11.0 | 13.2 |
| U | 1.0 | 0.9 | 6.6 |
| V | <5 | 9 | <5 |
| Y | 6 | 6 | 29 |
| Zn | 51 | 66 | 14 |
| Zr | 121 | 147 | 24 |
| La | 32.8 | 28.1 | 13.1 |
| Ce | 49 | 58 | 26 |
| Nd | 17 | 18 | 11 |
| Sm | 3.4 | 3.1 | 4.9 |
| Eu | 0.9 | 1.0 | 0.4 |
| Tb | <0.5 | <0.5 | 0.8 |
| Yb | 0.5 | 0.5 | 2.7 |
| Lu | 0.07 | 0.07 | 0.40 |

Fe_2O_3 : as total FeO, CIA*: Chemical index of alteration, WPI**: Weathering potential index by Nesbitt and Young (1982).

있으며, Ba, Cd, Rb 등의 원소들은 큰 변화를 보이지 않았다.⁸ 희토류 원소의 경우 대체적으로 평행한 곡선형

태를 가지고 있으며, 경회토류 원소가 중회토류 원소보다 크게 부화되어 있다.⁹ 경회토류 원소의 경우 La/Eu로 갈수록 부화도가 큰 반면에 중회토류 원소는 일정한 부화도를 보인다.

전암 시료에 대한 전체적인 주성분의 화학조성을 보면 SiO₂가 64.15~74.90 wt.%로 상당히 유동적인 함량을 가지고 있으며, Al₂O₃ 함량도 13.17~15.34 wt.%로 유동적이지만 전형적인 화성암의 범주 안에 있다. 또한 CaO와 Na₂O 및 K₂O의 함량은 각각 1.43~7.27 wt.%, 3.52~3.89 wt.%, 4.05~5.02 wt.%이며, Fe₂O₃ 함량이 0.57~2.16 wt.%로써 중성에 가까운 산성 화성암에 속함을 알 수 있다. 이러한 분석치는 암석의 화학적 진화를 설명하는데 많은 문제점을 내포하고 있다. 이는 전암 시료로 채취된 부분이 심한 풍화작용을 받았기 때문이다.

화강암류의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(CIA: chemical index of alteration)와 풍화잠재지수(WPI: weathering potential index)를 구할 수 있다.^{10,11} 일반적으로 풍화지수는 유동성이 작은 Al₂O₃에 대한 알카리 원소의 변화를 나타내는 것으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 지시한다. 풍화잠재 지수는 0을 기준으로 양의 값을 보이면 화학적인 풍화 작용에 민감하다는 것을 지시한다. CIA는 47.32~56.02(평균 53.08)로 신선한 화강암에 비해 대체적으로 약간 높은 화학적 풍화도를 보인다. WPI는 4.39~6.56(평균 5.60)으로 화학적인 풍화작용의 잠재력은 아주 높은 것으로 나타났다.

이 결과로 보았을 때 풍화는 1차적으로 강한 콘크리트의 영향을 받은 후에 점차적으로 백화의 영향을 받고 있다. 그러나 백화에 의한 풍화보다 콘크리트에 의해 광물 조적이 더 파괴된다는 것을 알 수 있었다. 그리고 암석의 풍화잠재력만 보았을 때, 이 암석은 화학적 풍화작용이 활발히 진행되는 정도가 높지 않은 것으로 보아, 이미 풍화되어 완속단계인 원소의 증감현상이 반영된 것으로 해석할 수 있다.

3.4. 백화현상

3.4.1. 산출상태

미륵사지 석탑에 발생하는 백화는 암석 표면에서 발

생되는 회색이나 백색의 고체 분말형 결정으로 콘크리트 내부로 수분을 흡수하면서 가용성분을 유리시켜 다시 콘크리트와 암석 표면으로 누출시켜 수분만 증발되어 발생하는 현상이다. 수분 속에는 칼슘, 칼륨, 마그네슘 및 기타 무기질을 용해시켜 공기 중의 이산화탄소나 물속에 녹아있는 무기물들과 서로 결합하여 탄산염, 황산염, 질산염, 염화염 등을 포함하고 있다. 이러한 염들은 수분의 유동에 따라 증발되면서 염들만 암석표면에 피각 된다.

이런 과정이 지속적으로 발생하게 되면 회백색 꽃 모양을 형성하는데 일반적으로 백화(efflorescence)라 부르기도 하고 scum, saltpeter 라고도 한다. 초기의 백화는 배합시 발생하는 혼연수에 의한 백화로서 쉽게 제거되지만, 이차 백화는 양생시에 유입수로 인해 발생하는 백화로 쉽게 제거되지 않는다. 백화는 단순히 심미적 문제이거나 우수에 의해 자연적으로 제거될 수 있는 일시적인 현상일수도 있다. 그러나 암석의 풍화작용에 의해 암석조적이 이루어져 있거나 층상 절리나 균열과 같이 패인 홈이 있다면 심각한 파괴를 가할 수 있다.

따라서 계속적인 염들이 피각 되어 두꺼운 층을 형성하게 되면 약화된 표면을 바로 박락시키거나 분리시켜 심각한 파손이 발생된다. 백화의 지속성을 제거하기 위해서는 수분의 존재나 용해되는 무기물 및 표면 증발되는 원인을 방지하여야 한다. 원천적으로 시멘트를 사용하지 않으면 이러한 현상을 방지할 수 있으나 이미 이 석탑과 같이 시멘트를 사용하였다면 백화 물질이 석출될 것이다. 특히 시멘트 성분 중 소석회에 의해 백화정도가 달라질 것이다.

소석회는 시멘트 주성분의 수화반응에 의해 양생되면서 필연적으로 생성되는데 많이 생성될수록 강도발현이 좋아진다. 그러나 용해도가 높기 때문에 알카리염 형태로 초기에 많이 발생된다. 이후에는 외부의 침습으로 또 다시 용해유출 되어 이차 백화를 유발한다. 암석 표면에 석출되면 탄산화 과정을 거치는데 이때 난용성 물질로 변화되면서 유해를 가한다. 이러한 현상은 중성화가 진행될수록 지속적으로 발생되다가 서서히 감소한다.

3.4.2. 발생 요인

백화현상은 전자에서 살펴보았듯이 시멘트 경화체에서 유출되어 수분만 증발하여 표면에 각종 염들이 석출되는 것으로 우수의 이동경로와 밀접한 관계를 가지고

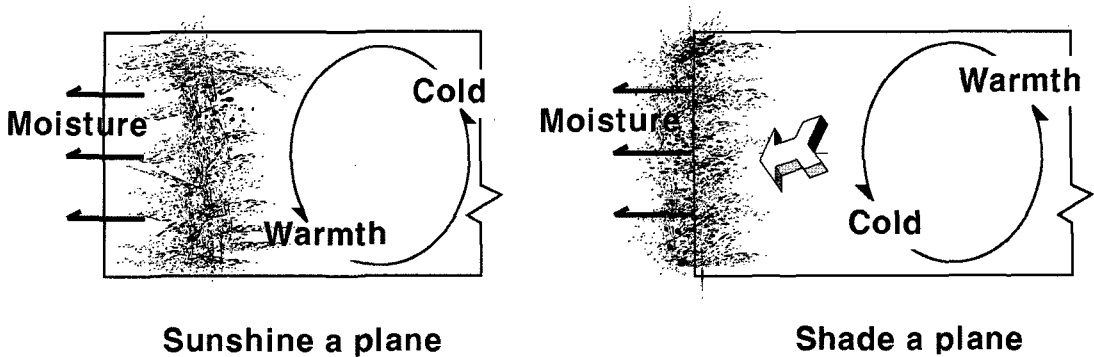


Figure 5. The form of efflorescence occurred on the bright side and dark side.

있다. 근본적으로 같은 조건에서 시멘트를 사용하였다더라도 표면에 백화가 발생하는 경우와 미발생 되는 경우도 있다. 이는 시멘트/함수비, 배합비율, 작업방법에 의해 달라질 수 있다. 또한 콘크리트 재령이나 방위별 방향에 따라 달라지는 기상조건의 차이에 의해 강한 백화현상을 일으키고 있다.

실례로 미루사지 석탑을 보면 북측면이 남측면보다 백화가 많이 발생되었고 또한 직접적으로 광선에 노출되지 않는 부분에 더 많은 백화가 발생되었다. 이러한 원인은 북측면이나 음지가 수분 증발이 빠르지 않고 적당히 증발되므로 내부에서 가용성 염이 흡수된 수분을 표면에 지속적으로 석출이 가능하도록 알맞은 조건을 갖추었기 때문이다. 따라서 일광면에서는 백화 발생이 적고 일음면에서는 백화가 많이 발생된다(Figure 5).

이 외에도 기온이 낮고 비교적 습도가 높거나 적당한 풍속을 유지하면 백화발생을 촉진한다. 특히 겨울철 저온시 백화 발생이 심한 이유는 고온 보다 상대적으로 저온일 때 시멘트의 수화반응물질 생성이 늦어지고 모세관의 충진이 불충분하여 수분의 이동이 용이하게 되며, 미반응 시멘트 부분이 장기간 잔류함으로써 소석회의 공급이 증가됨에 따라 용해도가 크기 때문이다.

따라서 백화를 유발하는 요인은 외적인 요인과 내적인 요인으로 나눌 수 있다. 외적인 요인은 환경에 노출된 조건으로 저온과 다습할 때 그리고 차광이 잘된 곳, 적당한 풍속 및 시멘트 재령이 짧은 제품 일수록 백화가 잘 발생된다. 내적인 요인으로는 백화를 제공하는 주체로서 시멘트의 종류, 시멘트중의 알칼리나 유리석회, 분말도, 골재의 종류, 물/시멘트의 비율 및 시멘트/골재비, 혼화

재료 등의 제인자에 따라 백화 발생정도가 달라진다.

3.5. 수용성 오염물질의 분석

3.5.1. 물리화학적 분석

이 연구를 위해 백화된 시편을 대상으로 함침하여 채수된 시료를 분석한 결과는 Table 2, 3과 같다. 먼저 용매체에 따른 물리적 특성을 보면 pH 5.0 매질에서 온도(29.2~30.8, 평균 29.58℃)와 pH(6.28~7.07, 평균 6.68) 및 EC(22.2~32.2, 평균 27.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$)는 pH 6.2 매질의 온도(28.0~28.8, 평균 28.2℃), pH(5.89~7.15, 평균 6.52), EC(6.0~24.8, 평균 14.14 $\mu\text{s}/\text{cm}$)보다 높게 나타난 반면에 Eh(6.0~24.8, 평균 30.76 mV)는 pH 6.2 매질에서 높은 값을 나타냈다. 용매체 선택에 따른 가용성 무기오염물질의 용출정도를 알아보기 위해 pH와 대조하여 보았다. 이 결과, Eh는 부의 상관도를 가지나 EC는 정의 상관도를 가지고 있고 온도는 특별한 관계를 보여주지 않았다(Figure 6).

주성분 양이온의 평균함량을 보면 pH 6.2 용매체(Ca^{2+} : 171.239, Fe^{n+} : 0.029, K^+ : 4.418, Mg^{2+} : 0.124, Na^+ : 4.342, Si^{2+} : 3.268 mg/l)가 pH 5.0 용매체(Ca^{2+} : 3.485, Fe^{n+} : 0.020, K^+ : 1.698, Mg^{2+} : 0.162, Na^+ : 1.660, Si^{2+} : 0.707 mg/l)에 비하여 Na^+ 를 제외한 모든 원소에서 높은 용출함량이 갖는다. 다른 양이온 Al^{3+} , As^{2+} , Ba^{2+} , Co^{2+} , Cr^{2+} , Mo^{2+} , Rb^{2+} , Se^{2+} , Sr^{2+} , Un^+ , Vn^+ 등은 대체적으로 pH 6.2 용매체에서 높게 유리되었다.

용존 음이온의 경향을 보면 Br^- 및 PO_4^{2-} 은 검출한계

Table 2. Selected concentrations of minor elements from the solvent samples after reaction experiments.

| No. | Solvent | Time | Al ($\mu\text{g}/l$) | As ($\mu\text{g}/l$) | Ba ($\mu\text{g}/l$) | Cd ($\mu\text{g}/l$) | Co ($\mu\text{g}/l$) | Cr ($\mu\text{g}/l$) | Cu ($\mu\text{g}/l$) | Mn ($\mu\text{g}/l$) | Mo ($\mu\text{g}/l$) | Ni ($\mu\text{g}/l$) | Rb ($\mu\text{g}/l$) | Sn ($\mu\text{g}/l$) | Sr ($\mu\text{g}/l$) | U ($\mu\text{g}/l$) | Zn ($\mu\text{g}/l$) | |
|-------|---------|-------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------|
| MRS-2 | pH 6.2 | 1/2h | 552.43 | 2.165 | 3.512 | 0.056 | 0.278 | 2.239 | 2.451 | 4.114 | 0.876 | 2.113 | 15.313 | 2.464 | 28.731 | 0.374 | 7.435 | |
| | | Water | 1h | 262.96 | 2.126 | 1.718 | 0.002 | 0.067 | 1.726 | 4.439 | 1.371 | 0.765 | 0.698 | 13.941 | 1.102 | 25.186 | 0.257 | 0.957 |
| | | 2h | 8.889 | 0.479 | 0.601 | 0.040 | 0.784 | 0.866 | 3.186 | 0.662 | 0.152 | 0.739 | 1.273 | 0.446 | 5.475 | 0.006 | 1.639 | |
| | | 3h | 12.079 | 0.593 | 0.728 | 0.018 | 0.387 | 1.101 | 2.344 | 0.398 | 0.195 | 0.213 | 1.633 | 0.680 | 6.868 | 0.016 | 0.984 | |
| | | 5h | 19.839 | 0.945 | 0.632 | 0.023 | 0.436 | 1.353 | 5.296 | 0.720 | 0.183 | 0.326 | 1.974 | 1.063 | 9.097 | 0.023 | 0.886 | |
| | pH 5.0 | 1/2h | 3.957 | 0.278 | 1.348 | 0.162 | 0.278 | 0.287 | 8.710 | 1.356 | 0.196 | 4.093 | 1.077 | 1.186 | 5.816 | 0.009 | 6.003 | |
| | | Water | 1h | 6.885 | 0.386 | 1.305 | 0.122 | 0.337 | 0.429 | 4.398 | 1.402 | 0.256 | 3.420 | 1.471 | 1.614 | 6.920 | 0.010 | 3.485 |
| | | 2h | 16.855 | 0.565 | 1.071 | 0.060 | 0.411 | 0.828 | 5.775 | 1.893 | 0.327 | 2.676 | 1.994 | 1.143 | 8.061 | 0.011 | 3.179 | |
| | | 3h | 15.898 | 0.688 | 1.099 | 0.063 | 0.440 | 0.671 | 5.200 | 1.545 | 0.279 | 2.476 | 2.268 | 1.795 | 9.037 | 0.013 | 1.995 | |
| | | 5h | 19.915 | 0.812 | 0.971 | 0.033 | 0.380 | 0.828 | 5.461 | 1.198 | 0.326 | 2.358 | 3.024 | 1.431 | 11.408 | 0.024 | 1.596 | |

Table 3. Selected physical properties and concentrations of major elements from the solvent samples after reaction experiments.

| No. | Solvent | Time | Ca (mg/l) | Fe (mg/l) | K (mg/l) | Mg (mg/l) | Na (mg/l) | Si (mg/l) | T ($^{\circ}\text{C}$) | pH | Eh (mV) | EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | Cl (mg/l) | F (mg/l) | NO ₃ ⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | |
|-------|---------|-------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|---|--|-------|
| MRS-2 | pH 6.2 | 1/2h | 14.202 | 0.051 | 9.931 | 0.276 | 10.763 | 4.612 | 28.5 | 5.89 | 63.8 | 6.0 | 0.021 | 0.390 | 0.032 | 0.021 | |
| | | Water | 1h | 8.741 | 0.037 | 9.839 | 0.232 | 10.051 | 3.034 | 28.0 | 6.27 | 40.3 | 8.5 | 1.052 | 0.516 | nd | 0.052 |
| | | 2h | 2.549 | 0.016 | 0.545 | 0.032 | 0.217 | 2.725 | 28.2 | 6.59 | 20.6 | 13.8 | 1.199 | 0.646 | 0.630 | 0.324 | |
| | | 3h | 3.572 | 0.018 | 0.782 | 0.037 | 0.263 | 2.884 | 27.5 | 6.68 | 15.2 | 17.6 | 1.045 | nd | 1.303 | 1.042 | |
| | | 5h | 5.428 | 0.024 | 0.992 | 0.043 | 0.414 | 3.083 | 28.8 | 7.15 | -13.9 | 24.8 | 1.143 | nd | 0.125 | 0.052 | |
| | pH 5.0 | 1/2h | 1.843 | 0.014 | 1.268 | 0.155 | 1.380 | 0.506 | 29.3 | 6.28 | 40.0 | 28.0 | 1.508 | nd | 1.548 | 0.860 | |
| | | Water | 1h | 2.530 | 0.016 | 1.527 | 0.161 | 1.605 | 0.555 | 29.2 | 6.44 | 29.2 | 22.2 | 2.077 | nd | 0.048 | 0.381 |
| | | 2h | 3.626 | 0.020 | 1.787 | 0.176 | 1.779 | 0.761 | 29.4 | 6.71 | 14.0 | 25.1 | 3.538 | nd | 1.868 | 0.435 | |
| | | 3h | 4.296 | 0.022 | 1.902 | 0.167 | 1.768 | 0.799 | 29.2 | 6.89 | -0.30 | 29.5 | 2.176 | nd | 0.078 | 0.063 | |
| | | 5h | 5.129 | 0.026 | 2.006 | 0.151 | 1.768 | 0.912 | 30.8 | 7.07 | -9.8 | 32.2 | 3.703 | nd | 0.046 | 0.139 | |

nd: not detected

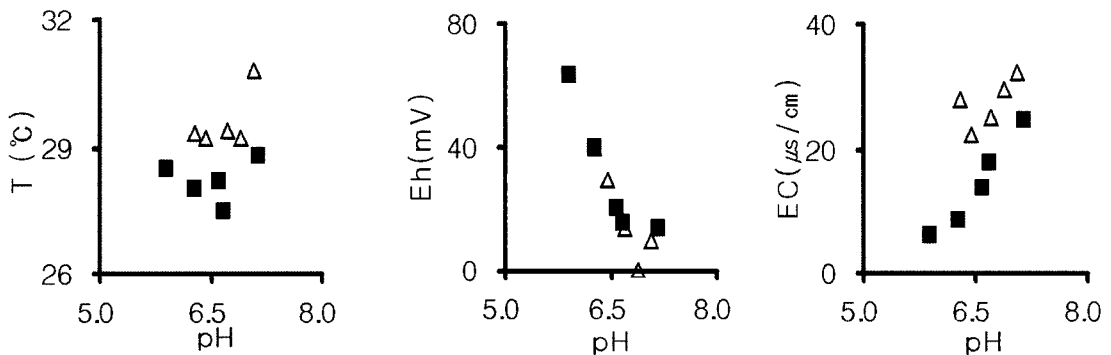


Figure 6. Plotted of T, Eh, and EC values versus pH of solvent samples after reaction experiments. ■: pH 6.2 solvent, △: pH 5.0 solvent.

미만으로 나타났고 F는 pH 6.2 용매제의 초기 특정시간에서만 용출이 되었으며, Cl⁻(2.600 mg/l), NO₃⁻(0.718 mg/l), SO₄²⁻(0.376 mg/l) 원소는 pH 5.0 용매제에서 용출함량이 높다. 전체적인 수용성 무기오염물

질을 보다 용이하게 제거하기 위해서는 주요 대상 오염종을 선택적으로 선정 후 가장 효과적인 용매제를 선택하여야 할 것이다.

pH와 대표적인 유리원소의 관계를 알아보기 위해

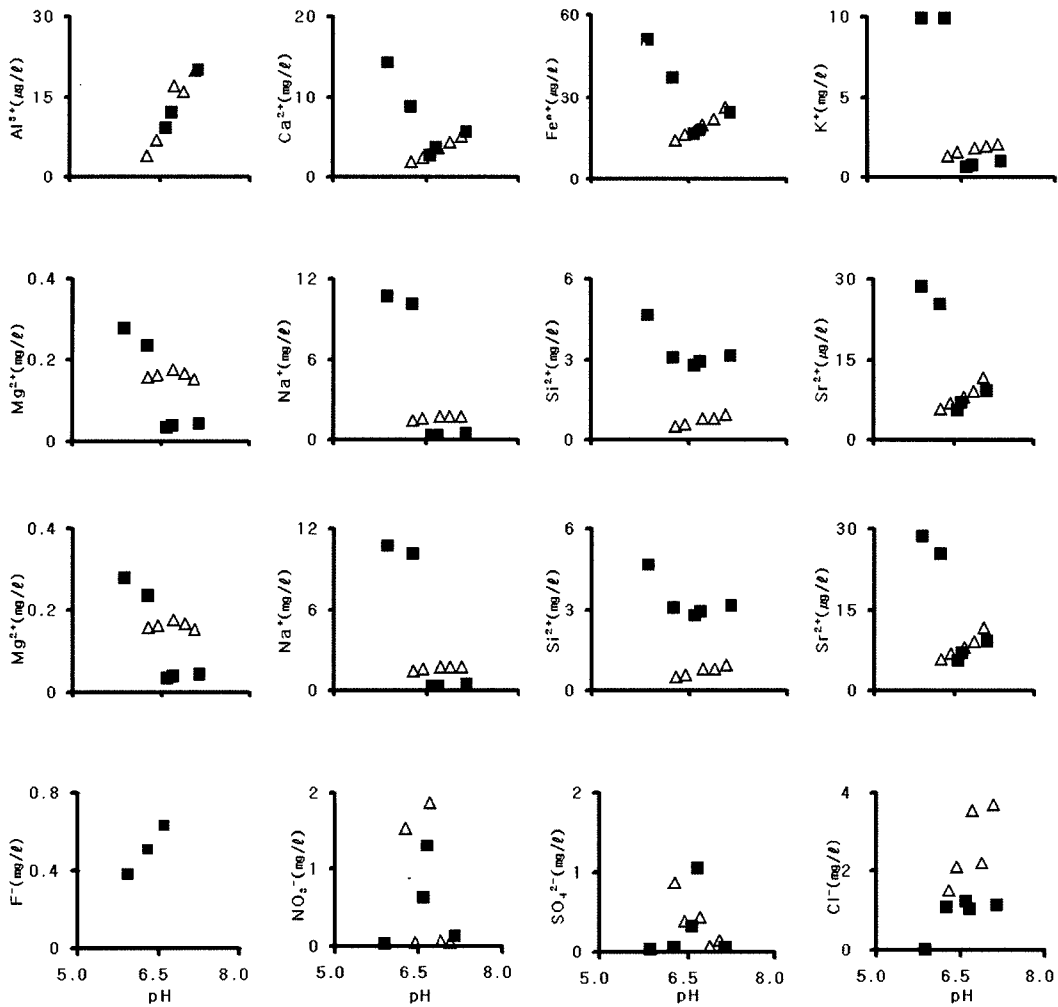


Figure 7. Concentrations of cations and anions versus pH of solvent samples after reaction experiments. ■; pH 6.2 solvent, △; pH 5.0 solvent.

pH를 고정성분으로 도시험 보았다(Figure 7). 이 결과, 유리되는 원소들은 중성수 부근에서 용출이 잘되고 있고 주성분 양이온은 pH가 증가함에 따라 많은 이온이 유리되고 있다. 미량 양이온 원소들은 용매제와의 반응시간에 상관없이 증가하거나 감소 또는 혼재 양상을 보이고 있다. 또한 음이온의 구성원소도 아주 불규칙하고 불안정하게 용출되고 있다.

3.5.2. 세정효과

이 실험에 적용된 석재는 현재 미록사지 석탑을 구성하는 부재중 하나이다. 이는 세정효과의 분석을 바로 미

록사지 석탑에 적용할 수도 있다는 의미이다. 따라서 부재를 장기간 함침하면 표면오염물을 더 효과적으로 세정할 수 있으나 먼저 충분한 임상실험을 거치지 않으면 안된다. 이런 문제 때문에 함침시간을 5시간으로 제한하여 가장 이상적인 세정방법 및 효과를 알아보았다. Figure 8은 함침시간에 따라 검출된 가용성 오염물을 그래프화한 것으로 용매제에 따라 세정능력이 확연히 다르다는 것을 알 수 있었다.

먼저 용존 양이온의 검출경향을 보면 pH 6.2 용매제는 초기 검출 함량이 높게 나타나다가 1~2시간 사이에서 급격히 감소하는 경향을 보이다가 다시 2시간 이후부

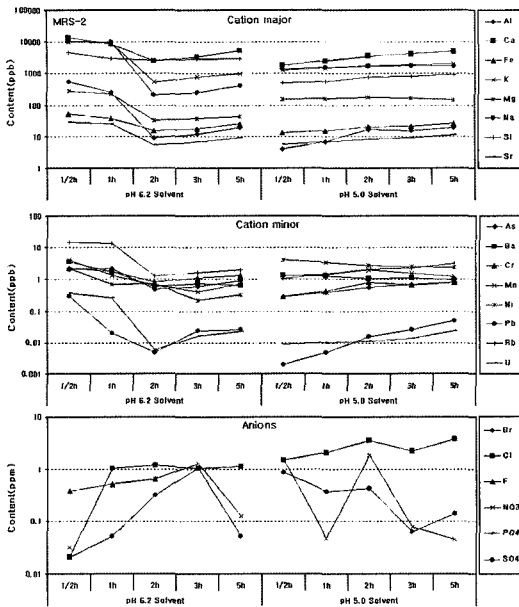


Figure 8. Concentration of dissolved-ion with reaction time.

더 약간씩 증가하는 국자형 산출곡선을 갖으나 최초 30분에 세정된 함량보다 낮게 나타났다. 반면에 pH 5.0 용매제에서는 전반적으로 함침시간이 증가될수록 용출함량도 증가되는 경향을 보이고 있다.

이러한 증가량은 최종 함침시간인 5시간에 도달하면 용매제의 선택과 무관하게 거의 비슷한 세정효과를 나타낸다. 음이온의 경우를 보면 Cl⁻는 pH 5.0 용매제에서 세정효과가 좋은 반면에 SO₄²⁻은 pH 6.2 용매제에서 효과적이었다. 이 외의 원소들은 검출한계 미만이거나 일정한 경향성이 없이 불규칙적으로 검출되었다.

pH 5.0 용매제 사용시 양이온의 거동특성을 보면 Co²⁺와 Cu²⁺ 원소를 제외한 모든 원소에서 최초 30분내에서 세정하였을 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그리고 pH 5.0 용매제는 혼재된 양상을 보인다. 함침시간이 길수록 검출함량이 증가하는 원소는 As³⁺, Ca²⁺, Fe³⁺, K⁺, Rb³⁺, Si²⁺, Sr²⁺, U⁴⁺이다. 최초 30분에서 가장 많이 용출되는 원소는 Ba²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, V⁵⁺이며, Sn²⁺은 2시간, Co²⁺은 함침한지 3시간 정도에서 검출함량이 좋았다. 음이온의 경우는 용매제와 상관없이 2시간 정도까지만 함침하는 것이 가장 이상적인 세정효과를 볼 수 있다. NO₃⁻는 약간 유동적이거나 3시

간까지 함침하면 검출함량이 높아진다.

지금까지 세정에 대해 살펴본 것과 같이 피각된 오염물을 제거하는데 사용될 용매제의 선택에도 신중하여야 한다. 그리고 특정 오염물질을 세정하기 위해 계획된 함침시간을 증가시켜주면 오염물을 선택적으로 제거하는데 효과적인 것이다. 따라서 양이온을 세정하기 위해서는 pH 6.2 용매제를, 음이온 세정이 주목적이라면 pH 5.0 용매제를 사용하였을 때 보다 효과적으로 많은 이온을 세정할 수 있을 것이다.

4. 보존과학적 고찰

4.1. 백화의 저지 방안

전국에 산재해 있는 전통적 석탑은 주로 암석을 가공하여 조립하였는데 부재사이에는 접착제를 전혀 사용하지 않으면서 활석이나 잡석 또는 흙을 이용하여 적석석 내부에 채움하는 형식으로 형태를 유지시켰다. 또한 수평을 맞추기 위해 흙이나 무쇠를 사용하기도 하였으며, 후대에는 부재간 이격을 방지하기 위해 나비장을 사용하기도 하였다.

석탑은 풍화를 받기 쉬운 환경에 노출되면서 암석구성 성분이 용해되어 입간조직을 약화시켜 변색, 박리현상, 표면과 전단면의 차별화된 침식, 절리면이나 균열대에 다양한 풍화특성이 진행되어 결국 절단이나 파손 이탈 등과 같이 구조물의 변형을 가져왔다. 또한 토사유출, 지반구조, 지진이나 낙뢰에 의해서도 구조물이 훼손되었고 훼손된 부분을 보강하기 위해 선인들은 보수나 개축을 통하여 현 상태를 보존하였다.

이와 같은 보수나 개축에는 당시 최선의 선택을 통해 선정하였을 것으로 예상되는 시멘트가 널리 이용되었으며, 활용 범위 또한 광범위하여 석조물 전체 표면에서 관찰된다. 따라서 시멘트 표면이나 맞댐면 그리고 인접 부분에서 주로 백색의 침상침전물이 피각되어 암석조직에 영향을 주거나 미술사학적 심미요인이 상충되어 나타난다. 이러한 백화현상을 근본적으로 해결하기 위해서는 시멘트와 같은 공급원을 차단하여야 한다. 그러나 환경에 노출된 간접적인 영향 요소를 제거하기란 상당히 어려운 일이다. 해염에 의한 백화현상이나 우수 및 수용성

알카리 용액에 의한 회색의 얼룩을 제거하기 위해서는 보호각을 건립하여야 하는데 이는 또 다른 훼손 원인을 제공할 수 있어서 신중한 검토가 필요하다.

현재 불안정한 기반을 강화하기 위해 콘크리트 구조체를 부분적으로 이용하거나 국보나 보물로 지정된 문화재에는 직접적으로 시멘트를 사용하지 않지만 상대적 문화재 가치가 낮은 비지정된 유구들은 보존적 의미보다는 관리적 차원에서 시멘트를 쉽게 사용하고 있다. 이러한 상황에서 백화를 방지할 수 있는 방법은 어떤 것이 있을 까란 문제점에 봉착된다.

시멘트 결점의 하나는 백화현상인데 이는 오래 전부터 많은 건축학자에 의해 연구되고 있으며 최근에는 시각적 차이는 있으나 보존과학자에 의해서도 규명되고 있다.^{12,13,14} 그러나 백화현상의 거동과 제어방법에 대해서는 아직까지 확실히 밝혀지지 않고 있으며, 백화발생에 따른 대책 또한 미봉책에 불과한 실정이다. 이러한 현상을 억제하기 위해 일부 백화방지제라고 부르는 혼화제가 시판되고 있는데 완전한 백화방지제는 아니다. 이는 기상조건 및 양생조건을 개선하여 이차적인 백화현상을 유도하는 원인물질을 줄이는 역할을 할 뿐이다.

따라서 이미 백화가 발생된 부분은 시멘트를 제거하지 않으면 억제하기가 어려우나 현재 시멘트를 보존적 측면에서 이용한다면 초기 원인물질을 저감시켜 어느 정도 백화현상을 방지할 수 있다. 시멘트 경화체내에는 백화발생에 필요한 알카리나 소석회와 무관하게 존재하고 있어 이들 성분을 효율적으로 관리하여 억제하는 방법들이다.

첫째는 백화성분과 반응하는 물질을 첨가하는 방법으로 탄산칼슘이 생성되지 않도록 소석회와 반응하는 물질을 첨가하면 불용성화하여 백화의 공급원을 차단하는 효과가 있을 것이다. 또한 소석회와 반응생성물이 모세관을 메우 수분의 확산저항을 향상시켜 결과적으로 백화발생을 억제할 수 있다.

둘째는 시멘트 경화체 표면에 방수층을 형성하게 하는 방법으로서 외부수의 삼투를 막아 이차적인 백화현상을 억제하기 위한 것이며, 편의에 따라 감수제인 계면활성제를 이용하여 혼연수 수량을 감소시켜 수분의 이동을 최대한 억제하는 방법이다.

셋째는 시멘트 경화체 표면에 약품을 뿌려 외부수의 침입을 막는 방법으로 표면 경화제와 박막 형성법이 있

다. 표면 경화제는 경화제를 시멘트 표면에 도포 또는 분무하여 표면 조직을 치밀화시켜 내부수나 외부수의 이동을 제한하여 백화 발생을 억제하는 방법이다. 박막 형성법은 투명 또는 착색수지, 유지계 용액을 시멘트 표면에 도포나 분무하여 박막을 형성시켜 외부수의 침입을 막는 방법이다.

이와 같은 방법은 기존에 시멘트로 처리된 부분에 적용하면 현재 진행 중에 있는 백화현상을 어느 정도 제한적으로 방지할 수 있다. 그러나 백화현상이 가장 잘 일어나는 부분은 콘크리트와 부재 맞닿면의 이음부분이다. 따라서 이 부분의 누수에 의해 발생하는 백화 발생억제는 어렵다. 이상 시멘트에 의해 발생하는 백화방지법을 알아보았지만 현재까지 완전한 백화발생 억제 방법이나 억제제는 존재하지 않는다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 근본적으로 시멘트를 사용하지 않는 것이 상책이다. 그러나 이미 시멘트가 적용된 유구들은 최소한 직간접적으로 우수의 영향을 받지 않는 대비를 한다면 백화발생을 제한적으로 방지할 수 있을 것이다.

4.2. 백화의 제거방안

문화재 보존을 위한 처리과정에서는 반드시 세정이 행하여지며, 기본적인 세정과 오염발생이나 훼손이 없도록 세심한 처리과정을 거쳐 세정하여야 한다. 단순한 건식 및 습식 세정은 일반적인 방법에 의거하여 처리하면 아무런 문제가 발생되지 않는 반면에 특정 오염물은 조심스럽게 접근하지 않으면 이차 오염을 유발할 수 있다.^{15,16,17} 석조문화재의 세정에 관해서는 Werner(1989)와 Bluck(1991)에 의해 여러 가지 방법과 문제점들이 지적된바 있다.^{18,19}

또한 Maureen(2000)등과 Meedonald(1992)은 석재 세정방법 중에서 여러 가지 기구를 통해서 연마하거나 산 또는 알카리 및 H_3PO_4 이 포함된 화학적 처리 방법은 때때로 처리 후에 바로 발생하거나 중장기적으로 손상을 유발시킬 수 있는 잠재력 요인을 가지고 있어 되도록이면 사용하지 말 것을 권장하고 있다.^{20,21} 인산염이 함유된 세정제는 세정 후 일정 기간이 지나면 오히려 적조 생물체들의 번식이 보다 왕성하게 되는 이차 오염을 유발하는 원인이 된다.²² 또한 석조물의 표면을 강한 산으로 처리하면 표면이 변색되거나 조직적인 안정성을 잃

어버릴 가능성이 높으므로 세정에 주의를 요한다고 지적하였다. 따라서 세정은 오염물질을 정확히 파악하고 난 후 과학적 방법에 의해서 수행하여야 한다.

미륵사지 서탑에 파악된 오염물은 시멘트 성분과 대기오염물질이 결합되어 백화현상을 유발하고 있는데, 주요 원인물질을 보면 이차 침전물인 탄산염(Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , MgCO_3)과 황산염(Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaSO_4 , MgSO_4) 계통으로 구분된다. 이와 같은 오염물을 제거하기 위해서는 물리적 방법과 화학적 방법을 사용할 수도 있고 고압의 물이나 스팀을 이용하여 제거하는 방법도 있다. 시멘트로 인해 발생한 백화성분은 표면에 침상성결정체로 성장하는데 먼저 물리적인 방법의 침금브러시나 페이퍼 등으로 표면을 연마하여 제거할 수 있다. 그러나 너무 과도한 작업은 표면의 광물 조직을 훼손시킬 수 있다. 이로 인해 다른 면과 색상이 달라 미관을 해칠 수 있어 주의하여야 한다.

백화가 표면에 고착된 경우는 백화성분을 용해할 수 있는 산을 이용하여 제거 할 수 있는데 1/10N 옥살산, 트리클로르 에칠렌, 염화매질, 계면활성제 등을 형겔에 묻혀 표면을 가볍게 문지르고 물로 수세한다. 이 방법은 국부적인 표면에 적합하나 광범위한 사용은 곤란하다. 물로 씻을 때 물이 다시 표면이나 시멘트 경화체에 재흡수 되어 백화를 발생시킬 위험성이 있으므로 수세시기는 하루 중 비교적 온도가 높을 때 시행한다.

이때 부재 표면의 온도는 약간 따뜻하다는 느낌이 있을 때 행하면 재흡수 되는 것을 방지할 수 있다. 산세하기 전에는 부재 표면에 충분한 물을 뿌려 주고 수세 후에는 비교적 짧은 시간 내에 수분이 증발되도록 한다. 또한 표면에 고착된 미량성분을 제거하기 위해 부재를 1~2 시간 정도 함침 시키기를 수회 반복처리 하면 효과가 있을 것이다. 특히 화학적 처리는 물리적 처리 방법보다 신중을 기하여 처리하고 과학적 적용성이 뒷받침된 약품이나 방법을 사용하여야 할 것이다.

5. 결론

1. 익산미륵사지 석탑의 구성암석은 담회색의 중립질 화강암으로 이루어져 있고 부분적으로 반상조직을 갖는다. 부재의 표면은 오염물질의 침착과 광물의

변질 및 변색 등으로 풍화되어 있다. 특히 시멘트에 의해 석회잔류물이 표면에 파악되면서 백화가 발생되어 미관을 해치는 것은 물론 암석의 조직을 파괴하고 있다.

2. 광물 조직의 풍화정도를 관찰한 결과, 표면의 오염물이 내부 조직까지 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. 부재의 CIA와 WPI는 각각 47.32~56.02, 4.39~6.56으로 신선한 화강암에 비해 약간 높은 화학적 풍화도를 보이고 있다. 또한 시멘트에 의해 일차적으로 풍화를 받은 상태에서 점진적으로 백화 발생을 유발하는 석회잔류물에 의해 광물조직이 파괴된 것으로 판단된다.
3. 백화는 수분의 이동에 따라 발생되는데 1차 백화는 쉽게 제거할 수 있는 반면에 2차 백화는 제거도 어렵지만 지속성과 유해성이 더욱 강하다. 특히 겨울철이 여름철보다 백화가 잘 발생하는 것으로 나타났다. 북측면이 남측면 보다 훨씬 심하다.
4. 수용성 오염물질을 세정하기 위한 용매제의 선택은 pH 5.0보다 pH 6.2 용매제에서 전반적으로 용출능력이 좋은 반면에 음이온의 경우는 pH 5.0 용매제를 사용하였을 때 더욱 효과적으로 많은 이온을 세정할 수 있다. pH에 대한 용매제의 물리적 특성을 보면 Eh는 명확한 부의 상관도를 가지고 있고 EC는 정의 상관도를 보인다.
5. 백화오염물질 제거는 먼저 건식세정과 약간의 물리적 도구를 이용하여 제거할 수 있다. 또한 미세한 오염물까지 제거하기 위해서는 약품을 이용하여 제거할 수 있으나 상당한 주의를 요하며 되도록 부분적 발생부위에 사용하고 충분한 수세를 해야한다.
6. 미세한 수용성 오염물질을 제거하기 위한 함침시간은 초기 60분내에서 가장 많은 오염종이 부화되는 결과를 얻었다. 따라서 세정제를 수회 도포하는 방식으로 반복처리하면 백화오염물질을 제거하는데 효과가 있을 것이다.

참고문헌

1. 전라북도 "미륵사지 유물전시관 이야기". 익산지구 문화유적지관리사업소, 11-13 (1999).

2. 국립지리원 “논산(090) 1:5,000 지형도”. 국립지리원, 도엽번호 NJ52-26-092, (1999).
3. 국립문화재연구소, “익산 미륵사지 석탑 해체조사 보고서 II”. 국립문화재연구소 연구보고서, 199-217 (2003).
4. 문화재관광국, “문화재대관”. 문화재관리부, 사적편, 개정판, 상 338 (1998).
5. 문화재청, “문화재 지식정보센터, <http://www.ocp.go.kr/>, 미륵사지석탑”. 문화재청, (2005).
6. 국립문화재연구소 “익산 미륵사지 석탑 해체조사 보고서 I”. 국립문화재연구소 연구보고서, 262-266 (2002).
7. S.F. Murphy, S.L. Brantley, A.E. Blum, A.F. White, and H. Dong, “Chemical weathering in tropical watershed, Luquillo mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering”. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 62, 227-244 (1998).
8. J.A. Pearce, “Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins”. In C.J. Hawkesworth and M.J. Norry. (eds.), *Continental basalts and mantle xenolith*, Shiva, 230-249 (1983).
9. W.V. Boynton, “Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies”. In P. Henderson. (ed.), *Rare earth element geochemistry*, Elsevier, 63-107 (1984).
10. H.W. Nesbitt and G.M. Young, “Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites”. *Nature*, 299, 715-717 (1982).
11. H.W. Nesbitt and G.M. Young, “Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations”. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 48, 1523-1534 (1984).
12. 이찬희, “전탑 등에 발생하는 백화현상의 원인과 대책 연구”. 국립문화재연구소 연구보고서, 석조문화재보존관리연구, 134-159 (2001).
13. 국립문화재연구소, “석조문화재 보존관리 연구”. 국립문화재연구소 연구보고서, 제1권, 92-98 (2002).
14. 국립문화재연구소 “석조문화재 보존관리 연구”. 국립문화재연구소 연구보고서, 제1권, 67-80 (2005).
15. 이상현, “석재문화재 보존에 있어 세척과 보존처리 문제”. *문화재과학기술*, 1, 124-128 (2001).
16. 조현영, 하영매, “석재문화재 보존 처리용 세정제 개발을 위한 기초연구”. *문화재과학기술*, 1, 49-63 (2001).
17. 조현영, “석재문화재 보존 처리용 세정제 개발에 관한 연구 I”. *문화재과학기술*, 1, 113-121 (2002).
18. M. Werner, “Research on cleaning methods applied to historical stone monuments”. In: *Science, Technology and European Cultural Heritage, Bologna, Italy*, 688-691 (1989).
19. B.J. Bluck, and J. Porter, “Sandstone buildings and cleaning problems”. *Stone Industries*, 21-27 (1991).
20. E. Maureen, Young and Jonathan Ball, “Effects of conservation treatments on the weathering of sandstone and granite buildings in Scotland”. Proceedings of the new millennium international forum on conservation of cultural property, *Institute of Conservation Science for Cultural Heritage, Kongju National University, Korea*, 12-29 (2000).
21. J. Macdonald, B. Thomson, and K.H. Tonge, “Chemical cleaning of sandstone-comparative laboratory studies”. In: Webster, R.G.M.(ed), *Stone cleaning and the Nature, Soiling and decay mechanism of stone*, Proceedings of the international conference, 14-16th April Edinburgh UK, London, 217-226 (1992).
22. M.E. Young, “Algal and lichen growth following chemical stone cleaning”. *Journal of Architectural Conservation*, 4, 48-58 (1998).