

해염(Sea Salts) 분무에 의한 감은사지 삼층석탑(서탑)의 풍화현상에 관한 환경광물학적 연구

성소영 · 김수진* · 박찬수

한국기초과학지원연구원 서울분소 유해물질분석팀, *석조문화재 보존과학연구회

Environmental Mineralogical Study on Weathering of the Western Stone Pagoda in Gameun Temple by Sea Salts Spray

So Young Sung, Soo Jin Kim* and Chan Soo Park

Hazardous Substance Research Team, Korea Basic Science Institute

*Stone Conservation Science Laboratory

요약

염(Salts)은 일반적으로 가장 강력한 풍화요인 물질 중 하나이다. 염의 결정화(crystallization) 및 수화(hydration)작용은 석재의 화학적 풍화 뿐만이 아니라 물리적 풍화를 가속화 시킨다. 감은사지 석탑은 오랜 세월 대기 중에 노출되어 대기환경오염으로 인한 화학적 풍화 뿐만이 아니라 지리적으로 바다에 인접해 있어 바다에서 기원한 염화나트륨(NaCl)의 영향으로 다른 석조물에 비해 심한 물리적 풍화현상을 보이고 있다. 편광 현미경 및 SEM, XRD, XRF를 이용하여 석탑의 구성석재 및 염(salts)에 대한 분석을 실시하였으며, 용출실험을 통해 얻은 용액에 대해서는 IC와 ICP-AES를 이용하여 분석하였고, 염류와 석재의 반응산물로 만들어진 염에 대해서는 정방위시료와 부정방위시료를 제작하여 분석하였다. 감은사지 석탑을 이루는 암석은 결정응회암으로 주 구성 광물은 사장석 및 정장석이며 소량의 석영 및 흑운모 등이 함유되어 있고 소량의 유리질 석기로 구성되어 있다. 석재의 표면에는 주 구성 광물들의 화학적 풍화로 인해서 생성된 2차 광물로 팽창성 점토광물인 스멕타이트가 존재하며, 대기오염물질과의 결합에 의해 생성된 대표적인 황산염인 석고(gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 소금(halite, NaCl), 해양기원 염류인 소금성분과 대기오염물질이 만들어낸 테나다이트(thenardite, Na_2SO_4)가 존재한다. 이들 염류는 일차적으로 암석의 표면에 백화현상을 초래하기도 하고, 대기 중의 오염물질과 결합하여 일부는 흑화현상을 보이기도 한다. 또한 암석 내 수분이 증가할 경우 이들 염들이 암석의 공극이나 열극을 따라 내부로 이동하여 subfluorescence를 발생시켜 박락 및 박탈의 원인이 되었으며, 온도와 수분의 변화에 따른 이들 염(salts)의 수화 및 결정 작용 그리고 새로운 염(salts)의 침전작용을 반복하면서 석재 내부와 외부의 암석 및 결정에 균열과 미세열극 등이 생성되어 석재 자체의 구조적 안정성에 영향을 주고 있다. 따라서 감은사지 석탑은 지리적 환경 차이로 인해 일반적인 환경의 석조물들과는 다른 형태의 풍화양상을 보이고 있어서 풍화양상 및 풍화형태에 대한 정확한 연구와 이해를 바탕으로 보존대책이 마련되어야 한다.

1. 서론

감은사지 삼층석탑 서탑은 7세기 통일신라시대 초기의 석탑 중 한 기로, 이 탑의 가장 큰 특징은 각 부분들이 하나의 통돌로 이루어진 것이 아니라 수십 개에 이르는 부분석재로 조립되었다는 것이다. 또한 최근 몇 십 년 동안의 급속한 환경의 변화로 인해 석재를 구성하는 암석이 매우 심하게 풍화되었으며, 암석 표면의 균열 과 박리 및 박탈로 인해 그 구조적 안정성이 문제 되어 최근 서탑의 해체 보수가 결정된 바 있다. 1960년 서탑의 해체 보수 이후 지금까지 감은사지 석탑에 대한 구조적 및 암석학적인 연구가 진행되긴 하였으나 석탑을 이루는 석재에 대한 환경광물학적, 보존광물학적인 연구는 실제로 이루어지지 않고 있으며, 구성 석재에 대한 암석학적인 분류와 그 기원암에 대한 연구도 실질적으로 미흡한 상태이다. 또한 감은사지는 지리적으로 바다와 인접(0.5 Km)해 있어 대기 뿐 아니라 해풍의 영향 및 바다에서 직접적으로 날아오는 염분에 의해 영향을 받고 있다. 특히 바다에서 기원한 염 및 염화나트륨(NaCl)은 석조물에 또 다른 형태의 풍화환경을 제공한다. 따라서 이번 연구의 목적은 감은사지 삼층석탑 서탑을 구성하는 각각의 암석에 대한 광물학적인 연구 및 일반적인 풍화환경에 있는 석조물이 갖는 화학적 풍화현상에 지리적 조건이 더해져 바다에서 기원하는 염류(Sea salts)의 영향으로 형성되는 감은사지 석탑에서 나타나는 특징적인 물리 화학적 풍화현상을 진단하는데 있다.

2. 실험방법

본 연구를 위한 시료는 감은사지 삼층석탑의 서탑 1층 기단부에 해당하는 석재로 사면에서 각각 채취되었다. 채취된 시료는 실체현미경을 사용하여 풍화정도를 파악한 후 박편을 제작하고 이를 편광현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 X-선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, Philips XPERT MPD, 40 kV/30 Ma, CuK)와 주사전자현미경(SEM, Leo 1455VP)을 사용하여 석재의 주 구성 광물상과 광물조성에 대한 분석을 실시하였으며, X-선 형광분석기(X-ray Fluorescence Spectrometer, Philips PW2404)를 사용하여 구성석재에 대한 전암분석을 실시하여 풍화에 의한 암석 및 광물의 변질정도를 측정하였다.

연구대상인 석탑이 오랜 세월 대기환경에 노출되었으므로, 이로 인한 물리·화학적 풍화로 생성된 2차 광물을 분석하기 위해 연구대상 석재에서 각각 2 μm 이하의 점토광물을 분리하여 시편을 제작하였다. 제작된 시료는 점토광물에 대한 정확한 동정을 위해 에틸렌 글리콜(Ethylene glycol) 처리 및 550°C 열처리를 실시하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 또한 감은사지가 지리적으로 해안에 가까이 위치한 것을 감안하여 염분에 의한 구성석재의 물

리, 화학적 풍화양상을 알아보기 위해 용출실험을 실시한 후 그 용출액에 대해서 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, DX-80)와 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometer, 138 Ultrace)를 사용하여 음이온 및 양이온 분석을 실시하였다. 또한 대기오염의 영향과 감은사지의 지리적 특성을 감안하여 석재의 표면에 생길 수 있는 염(Salts)의 종류와 이들의 특성을 알아보기 위해 남(KS), 북동(KNE), 서(KW) 측 표면의 시료를 각각 증류수와 1:5로 반응시킨 후 반응시간에 따라 6단계로 나누어 유리 슬라이드 위에 정방위시료를 제작하였으며, 실리카 기관 위에 부정방위 시료를 제작하여 각각 X-선 회절분석기를 이용하여 생성된 염의 종류를 분석하였다.

3. 연구결과 및 토의

감은사지 삼층석탑(서탑)은 육안관찰만으로도 그 풍화상태를 쉽게 짐작할 수 있다. 석탑의 표면에서 암석의 박리 및 박탈현상과 더불어 여러 곳에서 균열이 관찰되며, 대기 오염물과 암석 풍화산물의 영향으로 석탑 표면이 검게 또는 적회색으로 착색되었다. 또한 구성석재가 작은 압력에도 조그만 파편 및 단일 광물로 파쇄되어 석재의 내구성이 상당히 낮은 상태임을 짐작할 수 있다.

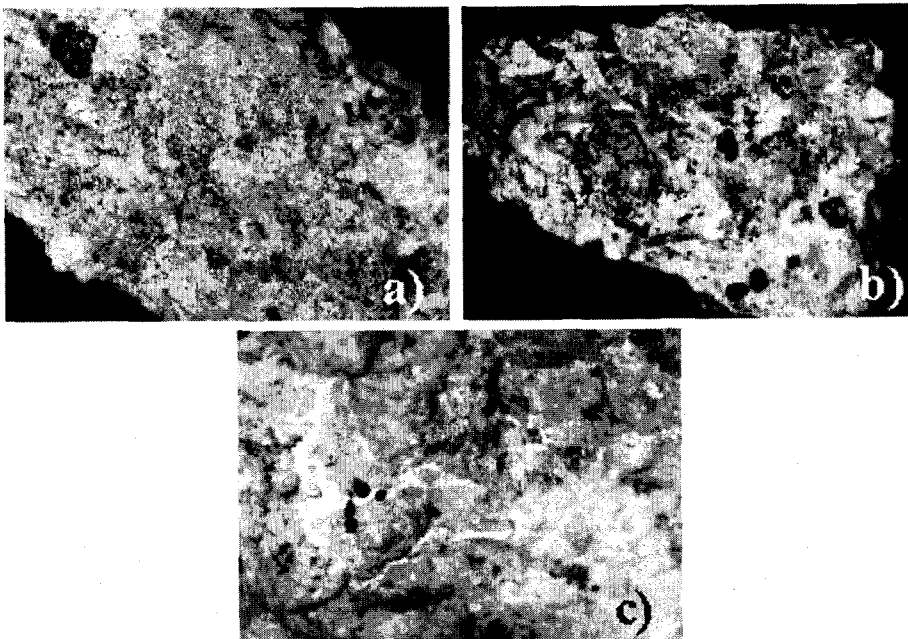


그림 1. 감은사지 삼층석탑(서탑) 구성 석재 암편의 실제현미경 사진.

실체현미경을 이용한 관찰결과 구성석재의 표면에 풍화로 인한 2차 생성광물인 점토광물이 집적하여 있는 것을 볼 수 있으며(그림 1a), 풍화가 심하게 진행된 부분에서는 결정입자의 경계부 등에 산화철에 의한 착색부가 관찰된다(그림 1b). 암석은 풍화로 인해서 구성광물이 석재로부터 쉽게 분리되어 떨어져 나온 것을 볼 수 있으며, 대기에 직접적으로 노출되지 않은 부분도 외부물질의 침투로 인한 풍화로 결정입자들 사이와 기질과 결정 사이에 풍화산물이 집적되어 결정을 피복하고 있는 것을 관찰할 수 있다(그림 1c).

편광현미경 관찰결과 석재를 구성하는 암석은 구성 광물 비에는 차이가 있으나 주 구성광물은 사장석, 알칼리장석이고 부성분 광물로 흑운모, 석영이 관찰되며, 유리질 바닥에 결정들이 있는 반상조직(porphyritic texture)을 보인다. 반정을 이루고 있는 광물은 대부분이 사장석이며 일부는 흑운모와 소량의 알칼리장석 등의 광물로 되어 있다(그림 2a, b). 사장석은 대체로 조립 및 중립질이며 부분적으로 누대구조를 보이고 있다(그림 2c, d). 또한 사장석의 일부는 입자내의 미세한 열극이나 입자 주변부를 따라서 점토광물로 부분변질 되어있으나 일부 입자들은 카올리나이트나 점토광물들로 변질되지 않고 물리적 또는 기계적인 풍화에 의해 입자들이 심하게 부서져있다(그림 3a, b). 흑운모도 대부분 조립질로 물리적·화학적

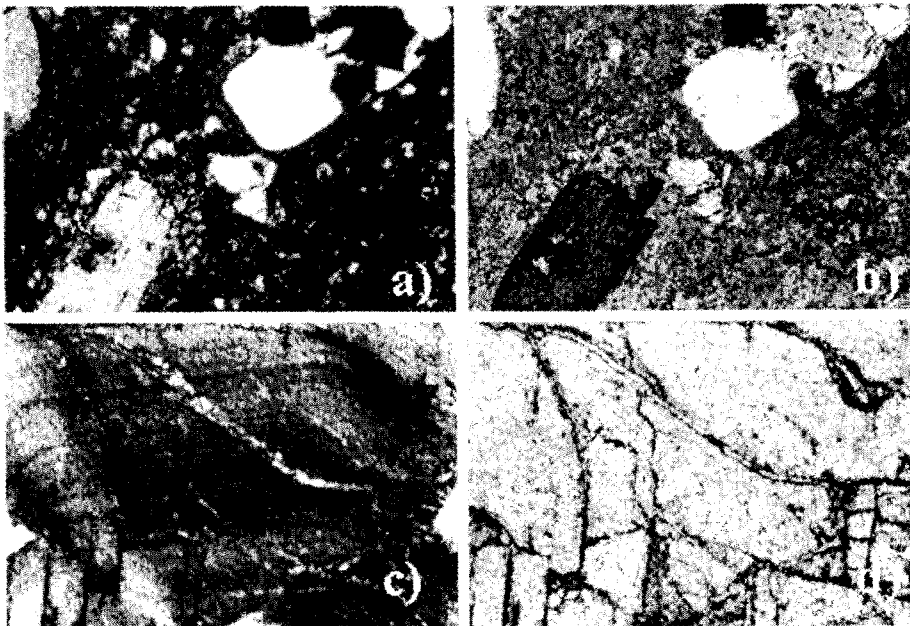


그림 2. 감은사지 삼층석탑(서탑)을 이루는 구성암석의 편광현미경 사진. a) 유리질 바닥에 흑운모와 사장석 결정들이 있는 반상조직을 보임, 직교니콜. b) 개방니콜. c) 누대구조를 보이는 사장석 결정입자, 결정 사이의 미세열극에 2차 광물인 점토광물이 충전되어 있다(직교니콜). d) 개방니콜.

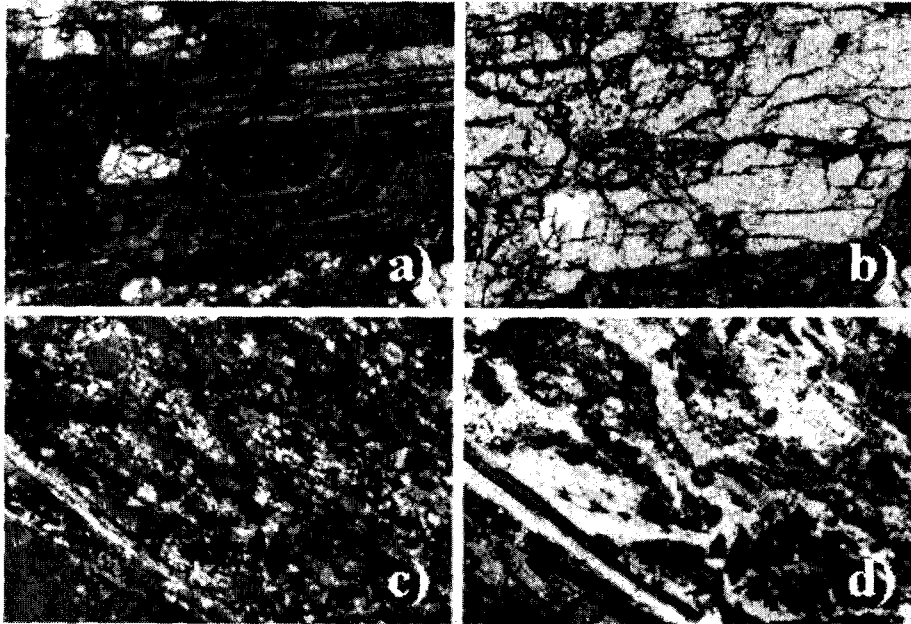


그림 3. 감은사지 삼층석탑(서탑)을 이루는 구성암석의 편광현미경 사진. a) 사장석 입자가 물리적·기계적 풍화에 의해 심하게 부서져 있음(직교니콜). b) 개방니콜. c) 심하게 풍화된 흑운모 입자(직교니콜). d) 개방니콜.

풍화로 인해 광물의 입자사이와 주변부 모두 부분적으로 변질되어 있다(그림 3c, d).

주사전자현미경(SEM-EDS)을 이용한 표면 조직 관찰 및 화학분석을 통하여 석재를 구성하고 있는 암석과 그 구성 광물들의 풍화상태를 확인할 수 있다. 감은사지 석탑 시료의 경우 오랜 시간동안 대기에 노출되어 있었으며 지리적으로 바다에 가까이 위치해 있어서 석재를 구성하고 있는 암석의 풍화가 상당히 진행된 상태이다. 특히 구성광물 중 상대적으로 풍화에 약한 사장석 및 흑운모등이 심하게 변질되어 있음을 확인할 수 있으며(그림 4a), 암석의 표면에는 이들의 풍화산물인 점토광물이 집적되어 있다(그림 4b).

에너지분산형분석기(EDS, Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용한 분석결과 석탑의 지리적인 위치로 인해 해양에서 날아오는 염분의 직접적인 영향으로 석재의 표면에 염화나트륨(NaCl)성분이 그대로 남아있음을 관찰 하였다(그림 5). 이 염화나트륨 성분은 직접적으로 물리·화학적 풍화에 영향을 미치게 되어 지리적으로 해양으로부터 염분의 영향을 받지 않는 다른 지역의 석조물에 비해 그 풍화속도를 가속화 시킬 수 있다. 또한 대기오염물질과 구성석재 중 칼슘성분과의 반응에 의해 만들어진 석고가 관찰되었는데(그림 4c), 이는 석재 표면에 백화현상 및 흑화현상 등을 유발시켜 암석의 풍화에 지대한 영향을 미치게 될 뿐만 아니라 외관상으로도 경관을 훼손하고 있다.

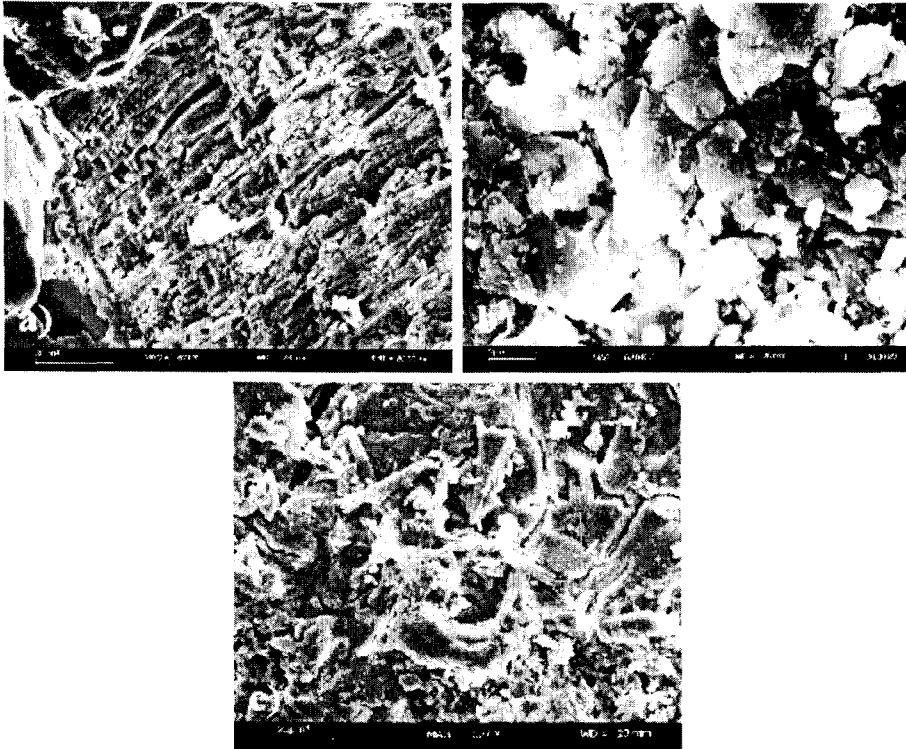


그림 4. 감은사지 삼층석탑(서탑)을 구성하는 암석에 대한 주사전자현미경(SEM) 관찰 사진. a) 풍화로 인해 심하게 변질된 사장석 입자. b) 풍화로 인해 암석의 표면에 집적된 2차 생성광물인 점토광물. c) 석탑 표면에서 관찰된 석고입자들.

석탑 기반부의 남(KS), 서(KW), 북동(KNE)쪽의 전암 시료에 대한 XRD 분석결과 주 구성광물은 사장석, 정장석 석영 등이며, 부성분 광물로 흑운모, 점토광물 등이 관찰된다. 그러나 감은사지 석탑이 부분석재로 조립되어 있어 각각의 구성석재마다 그 구성비에 있어서는 차이점을 보이는데, 서쪽(KW)과 북동쪽(KNE)의 기반부에 해당하는 석재는 주 구성광물 중 사장석이 73.7%, 정장석 10.4%, 석영 9.8%의 비율을 보이며 10% 정도의 운모류 및 기타 점토광물로 이루어져 있다. XRD 분석결과 서쪽(KW)과 북동쪽(KNE)의 두 측면의 석탑 시료에서는 상대적으로 사장석이 많고 석영은 아주 소량이 분석되는 반면, 남쪽(KS)기단부에 해당하는 석재는 다른 측면의 석재에 비해 석영의 함량이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다(그림).

구성석재가 풍화작용을 받아 의해 생성된 2차 광물인 점토광물의 종류를 알아보기 위해 각각의 시료에서 2 μm 이하의 점토입자를 분리하여 XRD를 이용하여 분석하였다. 분석결

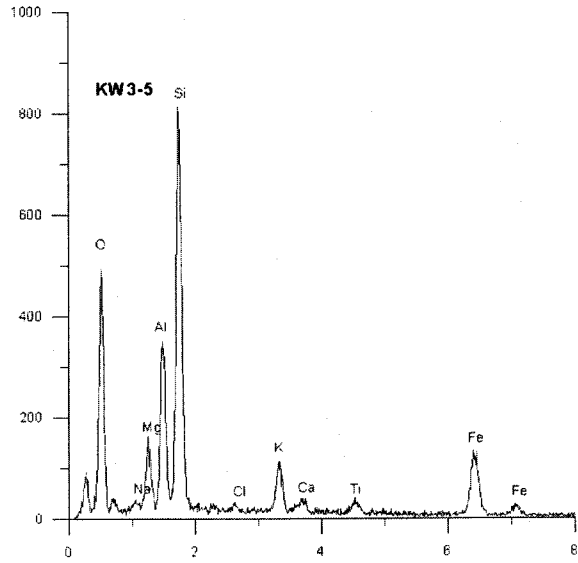


그림 5. 에너지분산형분석기(EDS)를 이용한 분석 결과.

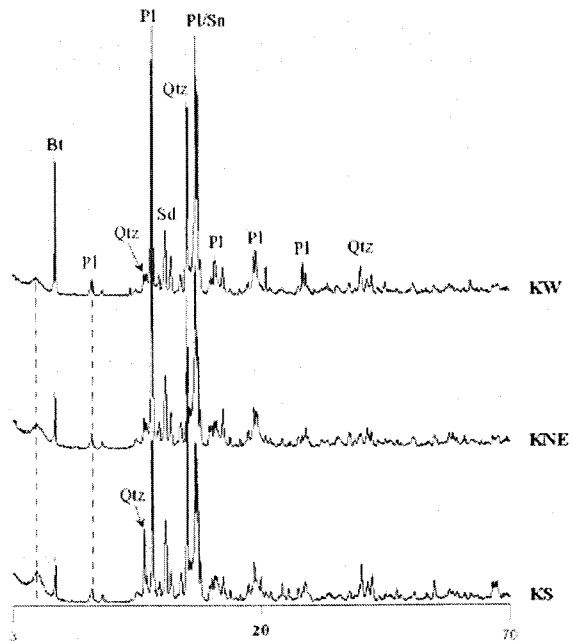


그림 6. 석재를 구성하는 암석에 대한 X-선 회절분석결과.

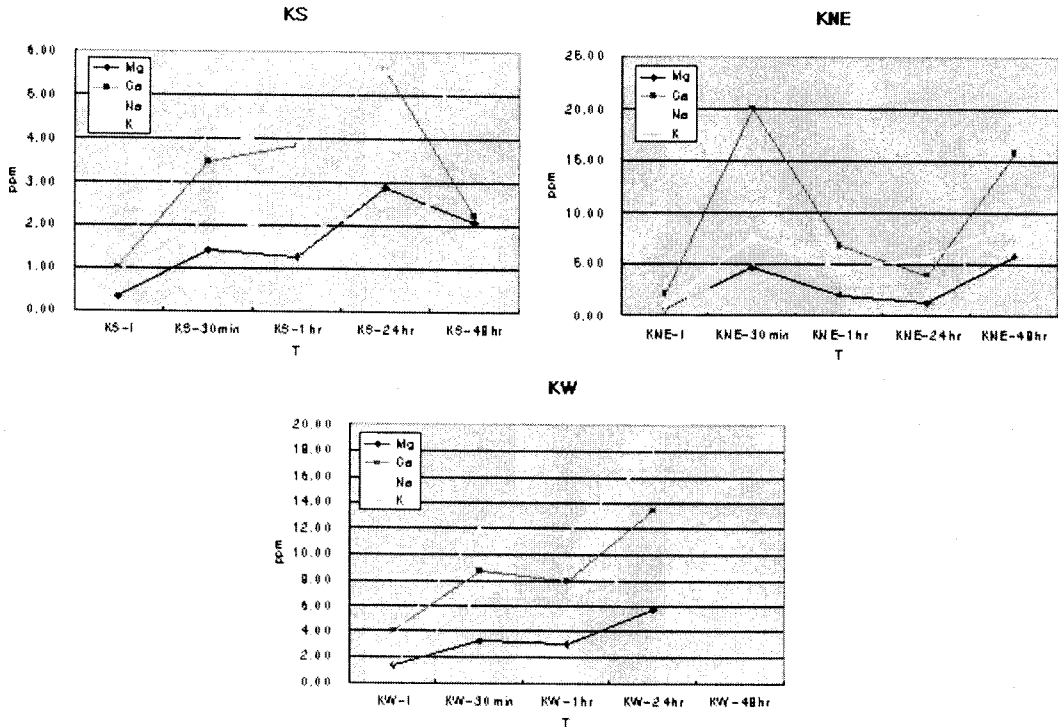


그림 7. ICP-AES를 이용한 용출실험 후 용출액에 대한 양이온 분석 결과.

과 함량의 차이는 있으나 모든 실험대상 석재에서 팽창성 점토광물인 스멕타이트가 검출되었다(그림 7).

스멕타이트는 주요 구성광물의 변질산물로 층간에 물분자를 흡착시켜 구조를 팽창시킬 수 있는데, 상대습도의 변화에 따라 최대 70~80%까지 그 구조를 팽창시킬 수 있다. 따라서 암석 내 공극 즉 입자와 입자 사이나 입자의 내부 미세균열 사이에 발달되어있던 스멕타이트가 수분이 존재할 경우 이를 흡수하여 팽창함으로써 다공성 암석의 경우 물리적 풍화의 원인이 되며, 또한 수분이나 기타 원인에 의해 석재의 다른 부분이나 암석내의 균열 등을 따라 석재의 내부로 이동하여 집적될 경우 스멕타이트가 갖는 팽창성으로 인해 구성석재의 물성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

감은사지는 지리적으로 바다에 근접해 있어 해풍 및 염분(Sea spray)에 의해 직접적인 영향을 받을 수 있다. 염분이 광물 및 암석의 풍화에 미치는 영향을 알아보기 위해 일정량의 시편을 증류수와 반응시킨 용출(dissolution) 실험을 실시하였다. 이는 증류수와 광물이 직접 반응하여 나온 이온들뿐만 아니라 암석 및 광물의 표면이나 공극 속에

포획(entrapped) 되어 있던 가용성 염(water-soluble salts)을 포함한 것이다. 실험은 석탑

기단부의 남(KS), 서(KW), 북동(KNE)쪽의 시료에 대해 반응시간을 기준으로 하여 5단계로 나누어 실시되었다. 용출실험 후 양이온 및 음이온 분석결과 이온의 종류에 따라서는 차이는 있으나, 증류수와 시편과의 반응시간이 길어질수록 용출되어져 나온 이온의 양이 증가하는 경향을 보인다.

ICP-AES를 이용한 용출액에 대한 양이온(Mg, Ca, Na, K) 분석결과 단계별로 약간의 차이는 있으나 세 개의 시료 모두 Na^+ 이온이 상대적으로 다른 이온에 비하여 높게 측정되었다(그림 8). Na^+ 이온은 석재를 구성하는 광물에서 녹아나왔거나 바다에서 날아온 염류 중 가장 대표적인 염화나트륨(NaCl) 성분이 석재 표면 및 입자나 공극사이에 집적하여 있던 것이 녹아나온 것으로 볼 수 있다. Na^+ 이온은 석탑 기단부의 남(KS) → 북동(KNE) → 서(KW) 측의 시료로 갈수록 용출되어 나온 이온들의 양이 증가하는 경향을 보인다(그림 8).

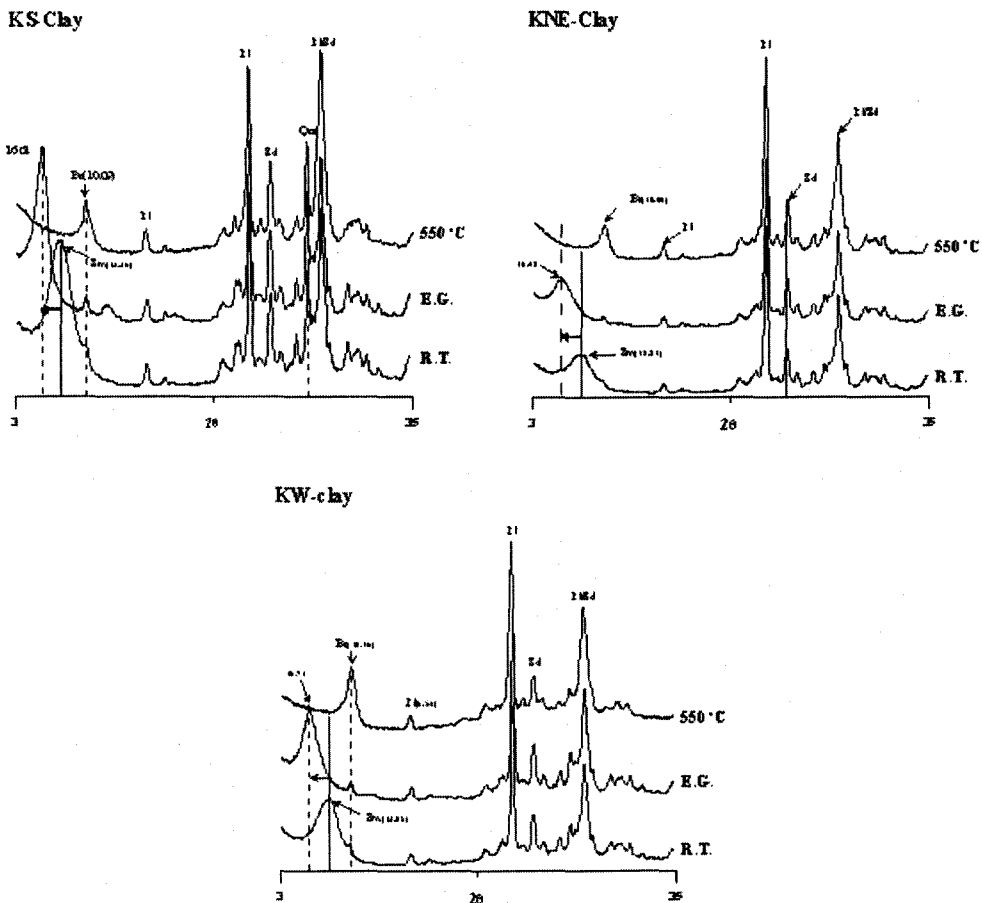


그림 8. 2 μm 이하의 점토광물에 대한 X-선 회절분석 결과.

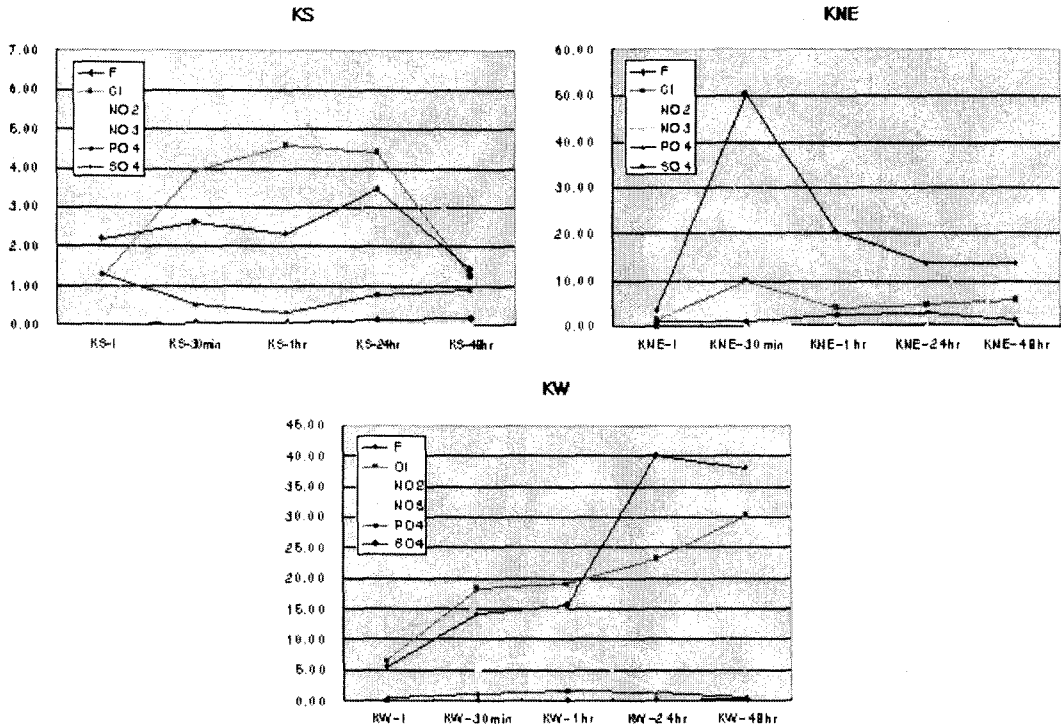


그림 9. IC를 이용한 용출액에 대한 음이온 분석결과.

IC를 이용한 음이온 분석결과 남측(KS) 시료와 북동측(KNE) 시료는 반응 초기에 급격한 증가를 보이다가 반응시간이 길어질수록 감소하는 경향을 보이는 반면 서측(KW) 시료는 반응시간에 비례하여 꾸준한 증가를 보이는 것을 관찰 할 수 있다(그림 9). 이 음이온의 경우는 양이온과는 다르게 광물과 용액과의 반응에서 지속적으로 녹아나올 수 있는 이온의 성분이 비교적 제한적이라는 것을 보여준다. 전체적으로는 석탑기단부의 남(KS) → 북동(KNE) → 서(KW) 측의 시료로 갈수록 측정된 음이온의 양이 상대적으로 증가하는 경향을 보인다. 분석결과 세 개의 시료 모두 NO_3^- , SO_4^{2-} 등의 이온이 다른 이온에 비하여 상대적으로 높게 측정되었는데, 이는 대기오염의 증가로 대기 중 SO_x 와 NO_x 의 양이 증가한 것에서 그 원인을 찾을 수 있다. 감포지역의 경우 지리적으로 공업화나 산업화가 많이 진행된 지역은 아니지만 인근에 대구나 울산, 포항 등 대규모 공업 및 산업단지가 위치하고 있어 이들에 의한 대기 오염의 영향이 큰 것으로 생각된다. Cl⁻의 경우 세 개의 시료에서 모두 다른 이온들에 비해 그 농도가 상대적으로 높게 측정되었으며 반응 초기를 제외하고는 반응시간과 관계없이 꾸준한 증가를 보인다. 이는 바다에서 날아오는 염(Sea Salts) 중에 염화나트륨(NaCl) 성분이 석탑에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 생각되며 이 염은 석탑을 구

표 1. 베를린-포츠담의 하루 동안의 수직으로 세워진 석재 표면에 도달한 태양복사에너지량(cal/cm²). Data from Schubert(1928)

총 복사량	겨울(cal/cm ²)	최대 복사량(cal/cm ²)
남측 사면	65	158, 4월 184, 9월
동측 사면	10	148, 6월
서측 사면	12	139, 6월
북측 사면	0	23, 6월

성하는 석재의 물리·화학적인 풍화작용을 가속화시키는 역할을 하게 된다.

석탑 기단부의 세 방향 시료에 대한 용출실험 후 양이온과 음이온의 분석결과 용출되어져 나온 양이온과 음이온의 양이 남(KS) → 북동(KNE) → 서(KW) 측의 시료로 갈수록 증가하는 것을 확인하였다. 이는 구성석재의 주요 조성광물비의 차이점도 있을 수 있으나 풍화에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 하나인 태양에너지에 의한 영향도 무시할 수 없음을 보여준다. Schubert(1928)에 의하면 수직으로 세워져 있는 석재의 평행한 면에 도달하는 하루평균 태양복사에너지의 측정 결과 남측 사면의 경우 184-65 cal/cm²에 달하지만 북측 사면의 경우는 23-0 cal/cm²로 상당한 차이를 보인다(표 1).

이 태양 복사 에너지는 풍화의 또 다른 주요 요인인 석재 표면의 온도 및 상대습도에 직접적으로 영향을 미치게 되는데, 석재 표면의 온도 및 습도에 따라서 석재의 공극과 미세열극 등으로 흡수되는 습기의 양이 달라진다. 감은사지 삼층석탑 서탑의 경우는 탑신 전면의 방향이 S45W로, 탑신의 북측과 서측 사면에 해당하는 부분이 모두 방위상 북측에 해당하게 된다. 따라서 탑신의 남측사면에 비하여 북동쪽과 서측사면에 해당하는 부분은 상대적으로 태양에너지의 영향을 적게 받게 되어 암석의 표면 및 공극에 수분함유율을 높여 가용성 염(Soluble-Salts)의 이동을 용이하게 하고, 석재의 풍화에 큰 영향을 초래하게 된다.

석탑 시료와 증류수와의 반응실험에서 생성된 염(salts)의 부정방위 시료에 대한 현미경 관찰과 XRD 분석에 의하면 반응 초기단계에서 생성되는 석고(Gypsum)는 침상형의 결정을 보이며, 그 결정도 또한 높지 않다. 그러나 반응이 진행될수록 단사주면과 저탁면을 갖는 결정이 확실히 성장한 것을 관찰 할 수 있었으며(그림 11), XRD peak도 sharp 해지고 FWHM 값도 상당히 낮아져 반응 시간에 따라 높은 결정도를 갖는 결정의 염이 성장한 것을 확인할 수 있다(그림 10).

석재의 표면에 생길 수 있는 염(Salts)의 종류와 이들의 특성을 알아보기 위해 제작된 정방위 시료에 대한 XRD 분석 결과 석고(Gypsum), 테나다이트(Thenardite, Na₂SO₄), 소금(Halite, NaCl) 등의 성분이 검출되었다(그림 12).

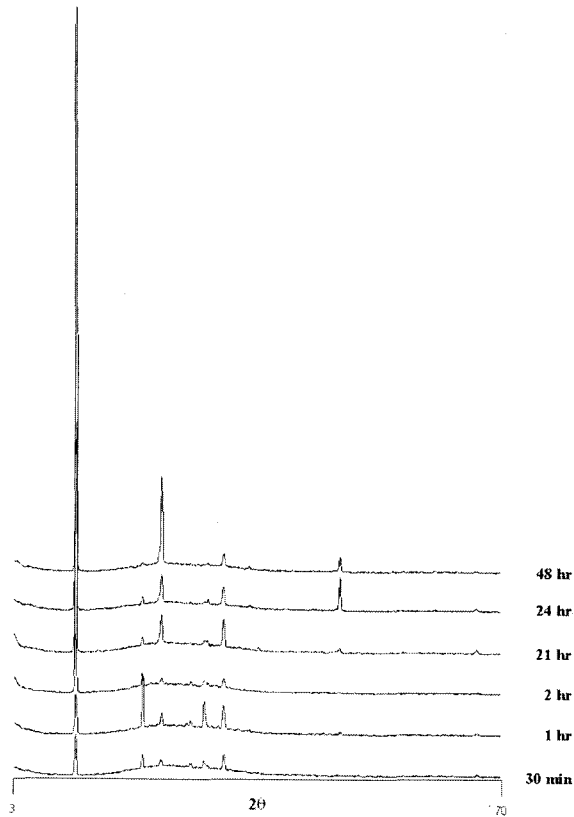


그림 10. 구성 석재와 증류수와의 반응 실험 후 생성된 염(salts)에 대한 정방 위시료의 X-선 회절분석 결과.

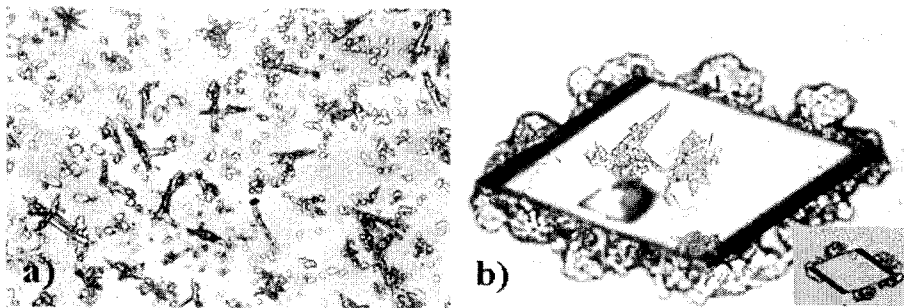


그림 11. 석탑의 구성 암석과 증류수와 반응실험 후 생성된 석고 입자 a) 반응 30분 후에 생성된 석고 입자 b) 반응 24시간 이후 생성된 석고 입자.

KW - dissolution sample

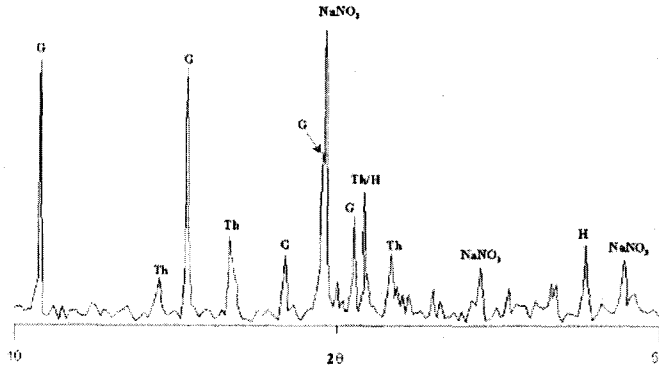
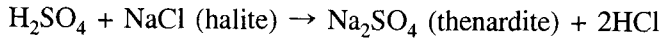


그림 12. 증류수와 반응실험 후 생성된 염(salts)의 부정방위 시료에 대한 X-선 회절분석 결과.

소금(halite)의 경우 바다에서 불어오는 염류의 가장 대표적인 형태로 감은사지가 바다에 인접하고 있어 직접 석탑의 표면에 집적된 것이다. 이 소금(halite)의 경우는 0.2°C 이상에서부터 결정화되기 시작하기 때문에 온도가 증가하고 감소함에 따라서 수화작용이 없이도 완벽한 용해(dissolution)와 결정화(crystallization)가 가능하다. 따라서 소금의 경우 그 물리적 풍화 작용으로 석재 표면의 붕괴를 가속화 시킬 수 있다.

석고(Gypsum)의 경우 대기오염물질 중 H_2SO_4 와 석재의 Ca^{2+} 성분의 결합으로 생성되는 대표적인 오염물질로 알려져 있다. 석고(gypsum)는 석조물의 표면의 백화현상(efflorescence)의 원인이 되며 이들 물질이 대기 중의 탄산화합물이나 대기 분진과 결합할 경우엔 흑화현상의 원인이 되기도 한다. 또한 석재의 표면이 부풀어 오르게 하는 Blistering의 원인으로 석재의 박리(exfoliation) 및 박탈현상이 일어나게 한다. 일반적으로 석고(gypsum)는 용해도가 낮기 때문에 석조물의 낮은 부분이나 석재의 표면에 집적되는 현상을 보이게 된다. 그러나 이번 실험결과와 같이 NaCl이 존재할 경우는 $H_2SO_4 + Ca^{2+} \rightarrow CaSO_4$ 의 반응에서 촉매제 역할을 하여 염산(HCl)을 형성하고, 석고(gypsum)가 만들어지는 반응을 지속가능하게 한다(Lubelli, 2003). 또한 석재가 적당한 수분을 함유하게 되면 소금(NaCl)은 석고(gypsum)의 용해도를 증가시켜 석재 표면 및 내부로의 이동을 증가시키게 되며 낮은 온도에서 석고의 수화(hydration)와 탈수(dehydration)가 가능하게 한다. 또한 석고(gypsum)와 소금(halite)등의 염(salts)이 석재의 표면에 efflorescence와 subflorescence를 만들어 암석의 박리와 박락을 초래하게 된다

테나다이트(Thenardite)는 대기오염물과 염분의 반응에 의해 형성되는 2차 생성물질이다. 감은사지가 해안에 위치하여 소금성분이 석탑표면에 집적되고 대기 중 SO_x와 결합하여 생성된다.



테나다이트는 높은 수화압력(hydration pressure) 과 정출압력(crystallization pressure)을 갖고 있다. 대기 중 상대습도가 증가하여 anhydrous phase 인 테나다이트가 decahydrate phase인 미라빌라이트(mirabilite, Na₂SO₄·10H₂O)로 수화될 때 최대 314%까지 volume 이 증가한다(Flatt and Scherer, 2002). 또한 테나다이트를 포함하고 있는 석재에 수분이 증가하게 되면 테나다이트의 용해가 일어나고 용액이 과포화되면서 미라빌라이트(mirabilite)로의 침전이 일어나게 되는데 이 과정에서 대부분의 암석이나 콘트리트의 장력(tensile strength)을 초과하는 힘이 생성된다(Tsui *et al.*, 2003). 따라서 테나다이트는 물리적으로 석재의 풍화에 상당한 영향을 미치게 된다. 또한 테나다이트와 같은 황산염은 석고에 비해 상당히 높은 용해도를 갖는다. 따라서 염이 만들어진 석재의 표면에만 집적되어 있는 것이 아니라 암석에 수분이 존재할 때 공극이나 열극을 따라 암석 전체로 이동하게 되어 암석의 파괴에 영향을 미치게 된다.

참고문헌

- B. Luelli, R. Hees, and C. Groot (2004). The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry, *Construction and Building Materials*, Volume 18, Issue 2, pages 119-124.
- Benavente, D. *et al.*, (2004). Role of pore structure in salt crystallisation in unsaturated porous stone, *Journal of Crystal Growth*, Volume 260, Issues 3-4, Pages 532-544
- Tsui N., Flatt R.J and Scherer G.W. (2003) Crystallization damage by sodium sulfate, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 4, Issue 2, Pages 109-115.
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E. and Sebastian, E. (2000). How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials, *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 10, 1527-1534.
- Sabbioni, C., Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layers, *The Science of The Total Environment*, Volume 167, Issues 1-3, Pages 49-55.
- Schwartz, J.D. (1928). *Sonnenstrahlung im mittleren Norddeutschland nach den Messungen in potsdam*. Meteorol Z 45: 1-16.
- Winkler, E.M. (1994). *Stone in Architecture*. Third Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Zappia, G. *et al.* (1998). Exposure tests of building materials in urban atmosphere, *The Science of The Total Environment*, Volume 224, Issues 1-3, Pages 235-244.