

감은사지 서탑의 풍화훼손도 진단 및 석재의 산지추정

이찬희^{1*} · 이명성¹ · 서만철² · 최석원² · 김만갑²

¹공주대학교 문화재보존과학과, ²공주대학교 지질환경과학과

Deterioration Diagnosis and Source Area of Rock Properties at the West Stone Pagoda, Gameunsaji Temple Site, Korea

Chan Hee Lee^{1*}, Myeong Seong Lee¹, Mancheol Suh², Seok-Won Choi² and Man Gap Kim²

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

²Department of Geoenvironmental Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

The rock properties of the West pagoda in the Gameunsaji temple site are composed mainly of dark grey porphyritic granodiorite with medium grained equigranular texture and developed with small numerous dioritic xenoliths. These xenoliths occurred with small holes due to different weathering processes. As a weathering results, the rock properties of this pagoda occur wholly softened to physical hardness because of a complex result of petrological, meteorological and biological causes. Southeastern part of the pagoda deteriorated seriously that the surface of rock blocks showed partially exfoliations, fractures, open cavities in course of granular decomposition of minerals, sea water spray and crystallization of salt from the eastern coast. The joint between blocks has small or large fracture cross each other, contaminated and corrupted for inserting with concrete, cement mortar, rock fragments and iron plates, and partially accelerated coloration and fractures. There are serious contamination materials of algae, fungus, lichen and bryophytes on the margin and the surface on the roof stone of the pagoda, so it'll require conservation treatment biochemically for releasing vegetation inhabiting on the surface and the discontinuous plane of the blocks because of adding the weathering activity of stones and growing weeds naturally by soil processing on the fissure zone. Consisting rock for the conservation and restoration of the pagoda would be careful choice of new rock properties and epoxy to reinforce for the deterioration surfaces. For the attenuation of secondary contamination and surface humidity, the possible conservation treatments are needed.

Key words : Porphyritic granodiorite, sea water spray, contamination material, weathering, exfoliation, conservation treatment, restoration

감은사지 서탑의 구성암석은 흑운모 반상 화강섬록암으로서 암회색을 띠나, 풍화면은 담회색 내지 담홍색을 보인다. 탑을 구성하는 부재에는 수 cm 내지 수십 cm의 엽기성 포획암이 많이 함유되어 있다. 이 부분은 풍화작용에 의해 크고 작은 공동을 형성하였다. 이 탑의 풍화현상은 지질학적, 기상학적 및 생물학적 원인이 복합적으로 작용한 결과이며, 전반적으로 암석의 강도가 약해져 있다. 탑에서 훼손이 가장 심한 부위는 동남쪽으로서 부재의 박락과 멸실, 공동화 현상 및 균열에 의해 탑의 원형이 거의 상실된 상태이다. 이는 동남쪽이 해변과 인접해 있어 해수분무와 염분의 결정화에 더욱 영향을 받은 것으로 보인다. 부재사이의 생성된 공간에는 철편, 철제 보강재, 암편, 콘크리트 및 시멘트가 충전되어 있으나, 이들의 산화와 부식에 따라 이차적인 오염물질과 침전물질이 산재하며 풍화가 더욱 촉진되고 있다. 모든 부재의 표면에는 지의류와 선태류의 오염이 심각하며, 파쇄대는 토양화의 진행에 의하여 잡초가 암석의 생물학적 풍화작용을 가속시키고 있다. 특히 각종의 옥개석에는 다년생 잡초들이 성장하며 부착생물의 피도는 거의 100%이다. 따라서 다양한 형태의 생물학적 풍화작용을 저감하기 위한 생화학적 처리가 필요하다. 석탑의 부재를 새로운 암석으로 교체할 경우를 대비하여, 새로운 석재를 선정하거나 구 부재에 강도를 증가시킬 수 있는 보강제를 연구해야 할 것이다. 본체의 균열이 심한 부분에는 보존처리용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 하며, 본체의 습도를 저감하기 위한 방수대책도 고려되어야 할 것이다.

주요어 : 반상 화강섬록암, 해수분무, 오염물질, 풍화작용, 박락, 보존처리, 수복

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

1. 서 언

감은사지 삼층석탑은 1962년 12월에 국보 제112호로 지정된 석조문화재이다(Fig. 1A). 이는 경북 경주시 양북면 용당리 동해안의 대종천 북쪽 언덕의 감은사지에 있으며, 연구대상은 동서로 있는 탑 중에 서쪽의 것이다. 통일신라가 남겨놓은 불국사와 석굴암의 석조 유물들은 1995년 유네스코에 의하여 세계문화유산으로 지정될 만큼 빼어난 수준을 자랑한다. 이 석조유물에 대하여 이미 역사학적, 고고학적 및 미술사학적 연구는 많이 있어 왔으나 암석의 종류와 지질학적 구조안정성, 암석학적 풍화와 훼손 및 보존방안에 관한 연구는 극히 미진한 실정이다.

대부분의 석조문화재는 상당히 풍화되어 있어 원암의 조직과 조성을 보존하지 않은 경우가 많으며, 문화재의 특성상 조금이라도 훼손시킬 수 없기 때문에 정량적 진단과 연구에 어려움이 있다. 석조문화재의 훼손은 근본적으로 강수(산성비)의 영향을 받으며, 온도 변화와 물-암석 반응에 따라 풍화잔류물을 남기고 이 잔류물이 결정화되면서 부피가 팽창하여 물리적 및 화학적 풍화를 가속화시키는 것이다. 또한 이 과정에서 제공되는 무기산과 공극은 조류, 선태류, 지의류 또는 고등식물의 서식처를 제공하게 되고 이들의 성장에 따

라 기계적 풍화작용은 가속화되게 된다. 이에 관한 종합적인 현상은 Price(1996), Lisci *et al.*(2003), 최석원 등(1999)에 의하여 보고 된바 있다.

생물은 장기간에 걸쳐 석조문화재의 표면환경을 변화시키면서 점유면적을 넓혀간다. 따라서 옥외에 있는 대부분의 석조문화재는 생물오염이 진전되기 전에 보존처리가 필요하다. 또한 대부분의 석조문화재에 발달된 불연속면 및 박리와 박락 부위의 접착과 보강이 요구된다. 이와 같은 보존처리에는 풍화도와 암석의 재질을 고려한 임상실험이 선행되어야 한다(Fidler, 2002). 이 연구에서는 감은사지 서탑을 중심으로 석재의 풍화대 형성과 풍화의 진행에 따른 주성분 및 미량 원소의 지구화학적 특성과 거동을 검토하여 석재의 원산지를 해석하였다. 또한 석탑부재의 기계적, 화학적, 광물학적 및 물리적 풍화도와 생물학적 훼손도를 평가하였다. 이 결과는 감은사지 석탑의 보존수복 시스템 정립에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 산출상태와 연구방법

2.1. 산출상태

감은사는 신라 통일의 영주인 문무대왕이 왜군을 물리치고자 창건한 호국대찰로서, 그의 아들인 신문왕 2

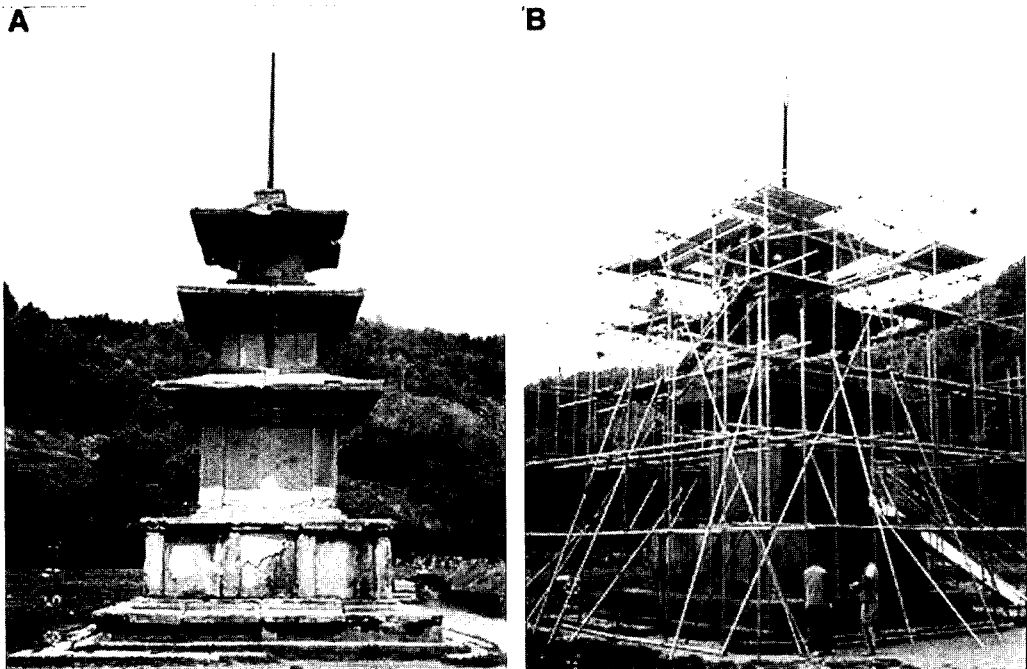


Fig. 1. Southwestern view of the West pagoda at the Gameunsaji temple site (A). There are intensively exfoliations on the rock surface of the basement properties. Photograph B set up the scaffold by stainless steel pipe and plates for detail survey.

년(682년)에 이르러 낙성된 것이다. 동서 3층 석탑의 건립 연대도 682년 이후로 떨어지지는 않을 것으로 추정하였다(정영호 등, 1999). 현재 모든 전각은 없어지고 석탑 2기만 남아있으며 높이가 13.4 m에 달하는 신라 최대의 3층 석탑이다. 이 탑은 동탑과 서탑이 거의 동일한 형태로서 하층기단을 지대석과 같은 면석을 암석으로 만들었고 12장의 석재를 사용하고 있다.

맨 위 기단은 면석 12, 갑석 8개로 구성했으며 기단석의 석재와 석재 사이의 탱주 수는 아래 기단에 3개, 위 기단에 2개의 기둥을 사용하였다. 상륜부는 오로지 3층 옥개석 위에 올린 네모난 노반만 남아 있으며 그 위로 무쇠의 찰주가 홀로 서있다. 상하층 기단 각 면에 우주와 탱주를 세워 목조건축의 축부를 모방하였고 탑신부도 양쪽 우주를 모각하였다. 옥개석은 폭이 줄어들었고 추녀 밑은 전각에 이르기까지 직선을 이루었으며 그 밑에는 몇 단의 층이 마련되어 있어 전탑의 양식을 보이고 있다. 옥개 상면인 낙수면은 전탑 형식과 달리 층급이 없는 경사를 이루고 있으며 전각에서 반전이 뚜렷하여 목조건축물의 지붕을 모방하였다(문화재청, 2004).

종합적으로 검토할 때 이 석탑의 전체 구조에서 기단부나 탑신부를 막론하고 목조건축을 모방하여 석재로 구현함으로써 신라석탑을 시원을 이루고 있다(정영호 등, 1999). 그럼으로 하층 기단의 탱주가 3주이며 1층 탑신 네 모서리의 우주도 별석을 세움으로서 시원양식의 각부가 그대로 신라식 정형의 모태가 되었고, 옥개 받침이 5단이고 낙수면은 지붕모양으로 경사를 보이게 되어 있다. 괴임 수법에 있어서도 상층기단을 받는 하층 기단 갑석 상면의 괴임은 각형 2단이며 옥개석 정상에 각형 2단의 괴임을 마련하여 그 위층의 부재를 받고 있다(Fig. 1).

현재 탑신부에 있어서도 장식적인 의장은 전혀 없으며 상륜부에 남아있는 부재도 없으나 철제 찰주의 높이는 5 m 정도로서 한국에서 최대이다. 이 감은사지는 1959년에 국립중앙박물관에서 처음으로 발굴 조사하였으며 이 때 서탑을 해체 수리하였다. 이때 3층 탑신의 사리공 안에서 희귀한 사리장치가 발견되어 현재 국립중앙박물관에 진열되어 있다. 이 사리장치와 탑의 형태는 후세의 보강이나 개조 등이 거의 없이 창건 당시의 모습을 보존하고 있는 것으로서 신라 전형의 탑을 연구하는데 아주 귀중한 자료이다(정영호 등, 1999).

2.2. 연구방법

이 연구에서는 감은사지 서탑의 물리적 또는 생물학

적 풍화특성에 관한 정밀조사가 실시되었으며(Fig. 1B), 이 탑에서 탈락된 동일한 암종에서 암석학적 및 광물학적 분석용 시료를 채취하였다. 또한 탑의 구조적 불안정, 균열상태와 바리 및 박락 장소에 관한 정밀조사가 수행되었다. 연구시료는 육안관찰에 따른 암상과 풍화등급으로 비교적 풍화가 되지 않은 유형과 풍화가 심하게 진행된 것으로 구분하여 채취하였다. 이 암석의 화학분석은 유도결합 아르곤 플라즈마 질량분석기(ICP, ICP-MS)와 중성자 활성분석기(INNA)를 이용하여 정량분석 하였다. 분석결과는 분석과정에서 필수적인 신뢰도 측정을 이용하여 평가되었다.

이 탑의 석재에 대하여 반정량적인 광물 조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하기 위하여 편광현미경과 전자현미경(SEM)을 사용하였다. 전자현미경은 LINK사의 에너지 분산형 X선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimadzu사의 ISI-SX-40 이다. 분석시료는 탄소와 금으로 이중 피복한 것을 이용하였다. 또한 일부 시료에서 X선 회절분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIIB였고, X선은 CuK α 에 조건은 30 kV와 15 mA 였다.

본체를 이루는 암석에 관한 조암광물의 상대적 함량비는 각각의 암석에 관한 박편을 대상으로 전통적인 방법에 따라 모드분석을 실시하여 계산하였다. 모드 조성은 자동계수기가 장착된 Leitz사 모델의 Orthoplan (071948) 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다. 전암대자율 측정은 10⁻⁵ SI 단위의 측정한계를 가진 KT-6 (Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하여 측정하였고 대자율의 세기는 10⁻³ SI 단위계로 표기하였다.

3. 암석 및 화학적 특성

3.1. 지질개요

감은사지 서탑을 구성하는 석재와 동일 종류의 암석을 노두에서 확인하고자 토함산과 감포 일대의 지질조사를 실시하였다. 이미 감은사지 부근의 지질과 화강암체에 대하여는 Lee *et al.*(1995)과 이준동과 황병훈(1999)의 연구결과가 보고 된 바 있으며, Lee *et al.*(1995)은 조성적인 차이로부터 각섬석 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암, 알카리 화강암의 3가지로 구분했다. 한편 이준동과 황병훈(1999)에 따르면 경주 부근 화강암체는 기재적인 차이로부터 6개의 암상, 즉 화강섬록암, 세리에이트 화강암, 반상 화강암, 등립질 화강암, 미문상 화강암 및 알카리 화강암으로 구분된다. 그

러나 하나의 화강암질 마그마에서도 고결과정에 따라 기재적인 차이를 보일 수 있다.

감포지역은 중생대의 백악기에 형성된 퇴적암류를 백악기 말에서 신생대의 고제3기의 에오세에 걸쳐 이들 퇴적암류를 분출하여 덮고 있거나 또는 관입하고 있는 화성암류로 이루어져 있다. 퇴적암류는 소위 하양층군의 대구층에 해당되는 것으로 주로 암회색의 세일과 적색사암으로 이루어져 있으며, 지역적으로 소규모의 역암층이 협재되어 있다. 이들 퇴적암류는 후기에 관입한 화강암류에 의하여 접촉부에서는 부분적으로 호른펠스로 변해 있기도 한다.

백악기 말에서 신생대 제3기초에 분출한 것으로 보이는 화산암류는 유천층군에 속하며, 이들은 주로 암회색의 안산암질 응회암과 담홍색 또는 연녹색의 유문암질 응회암으로 이루어져 있다. 제3기초에서 에오세에 걸쳐 관입한 것으로 생각되는 화강암류는 광물조성에 따라 각섬석-흑운모 화강섬록암 및 알칼리 화강암으로 분류되어진다. 각섬석-흑운모 화강섬록암은 토함산을 중심으로 동부 지역에 분포하고 있으며, 중립질에서 조립질 암상을 띤다. 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리 장석, 흑운모 및 각섬석이며, 저어콘, 인회석, 그리고 불투명광물들이 미량 함유된다.

구성광물은 대체로 자형에서 반자형의 결정형태를 나타내는 것이 특징이다. 흑운모 화강암은 마석산을 중

심으로 넓게 분포하고 있으며, 각섬석-흑운모 화강섬록암을 관입하고 있다. 이는 세립질 내지 중립질이며, 담홍색의 알칼리 장석이 비교적 많이 산출되는 것이 특징이다. 구성광물은 알칼리 장석, 석영, 사장석 및 흑운모이며, 저어콘, 인회석 및 불투명 광물들이 부수적으로 미량 수반된다. 알칼리 장석은 주로 퍼사이트로 이루어져 있으며, 보통 1~3 mm의 크기를 갖는다.

3.2. 암석 및 광물학적 특성

이 연구에서는 서탑 본체의 옥개석과 탑신에 박락되어 떨어진 암편을 회수하여 석재의 감정에 이용하였다. 이상현(1996)은 감은사지 동탑의 부재가 석영이 풍부한 화강암임을 발표한 바 있다. 그러나 감은사지 서탑을 구성하고 있는 암석은 강한 풍화작용으로 인하여 원암의 조성과 조직을 보관하고 있지 않을 뿐 아니라 암석기재적, 화학적 및 조암광물로 보아 명명이 쉽지 않은 암석이다. 그러나 모든 암석학적 특성으로 볼 때, 감은사지 서탑의 구성암석은 부분적으로 반정을 가지며 대소의 열기성 포획암이 함유된 화강섬록암으로서 토함산 화강섬록암의 연변상과 유사한 것으로 판단된다(Fig. 2). 풍화양상은 일견 화산 회류 응회암으로도 오인될 수 있다.

이 석재의 암상은 전체적으로 담회색을 보이나 부분적으로 담황색을 보이기도 하며 크고 작은 섬록암질

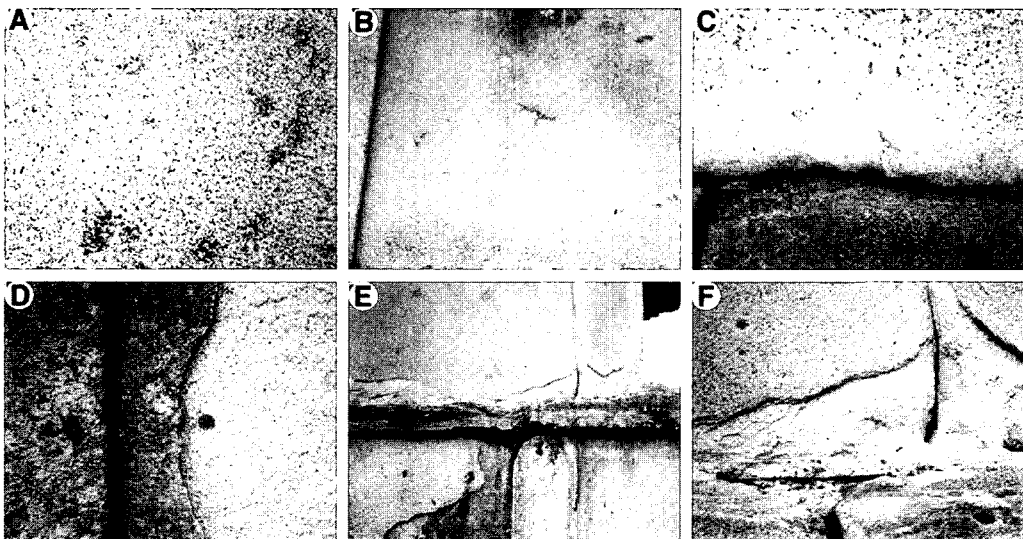


Fig. 2. Constituting rocks and lithology showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. (A) Face rocks of dioritic xenolith-bearing granodiorite at the basement. (B) Porphyritic granodiorite includes with small basic xenoliths. (C) Highly weathered granodiorite of main body overlies brown tarnished concrete. (D) Sheet-like exfoliation and dislocation of the rock surface showing the basement part. (E) Main body of basement rocks inserting concrete occurred with highly deterioration states. (F) Partly loss of each rock properties jammed concrete and iron plate into the block boundaries.

포획암을 가지고 있다(Fig. 2A, 2B). 그러나 암편이 박락된 부분에서는 중립질의 입상조직과 함께 흑운모, 석영 및 사장석의 균질한 괴상조직을 관찰할 수 있다(Fig. 2C, 2D). 암석의 표면에 판상으로 떨어져 나간 부분에서는 아주 작은 공극들이 발달되어 있는데 이는 기공인 1차적인 것과 풍화에 의해 석영 입자들이 부분적으로 분해되어 형성된 2차적인 것으로 구분이 된다(Fig. 2E, 2F). 전자는 보다 크며 불규칙한 형태를 보이고 부분적으로 예리한 모서리를 갖기도 하는 반면, 후자는 석영 입자의 크기 정도이며 대체로 원형을 나타내고 있다.

심하게 풍화되어 떨어져 나온 암석 파편을 박편으로 제작하여 현미경하에서 관찰한 비에 의하면(Fig. 3), 이 암석은 주로 석영, 사장석 및 흑운모로 구성되어 있으며, 소량의 정장석, 미사장석, 백운모, 불투명광물 및 녹염석 등이 수반된다. 석영은 대체로 결정면이 제대로 발달하지 않은 타형으로, 사장석은 반자형내지 자형으로 산출된다(Fig. 3A). 조암광물의 입간에는 Fig. 2B와 같이 비정질 수산화물이 교결조직을 보이며 충전

되어 있다. 흑운모는 판상으로 산출되며, 결정의 외연이나 벽개면의 발달이 매우 약하지만 견운모화 또는 녹니석화 되어있다(Fig. 3C). 염기성 포획암을 구성하고 있는 사장석은 칼스바드-알바이트 쌍정을 잘 보여 주며 누대구조를 띠는 것이 많다. 이 사장석과 흑운모는 대부분 강한 점토광물화 작용을 받았다(Fig. 3D).

이 서탑의 암석에는 기공이 발달하거나 염기성 포획물을 함유하는 경우가 있으며 이들이 빠져나간 자리는 큰 공동을 형성하기도 하였다. 이와 같은 암석 기재적 특징으로 볼 때, 토함산 동쪽에 분포하며 흑운모를 소량 함유하는 석영이 풍부한 각섬석-흑운모 화강섬록암의 연변부에 발달하는 암상과 가장 유사한 것임을 지시하여준다. 또한 후술하는 일부시료의 정량분석 결과를 Lee *et al.*(1995)의 것과 비교하여도 각섬석-흑운모 화강섬록암의 것과 아주 유사함을 보였다.

3.3. 암석화학적 특성

감은사지 서탑에서 수습된 암편의 주성분, 미량원소

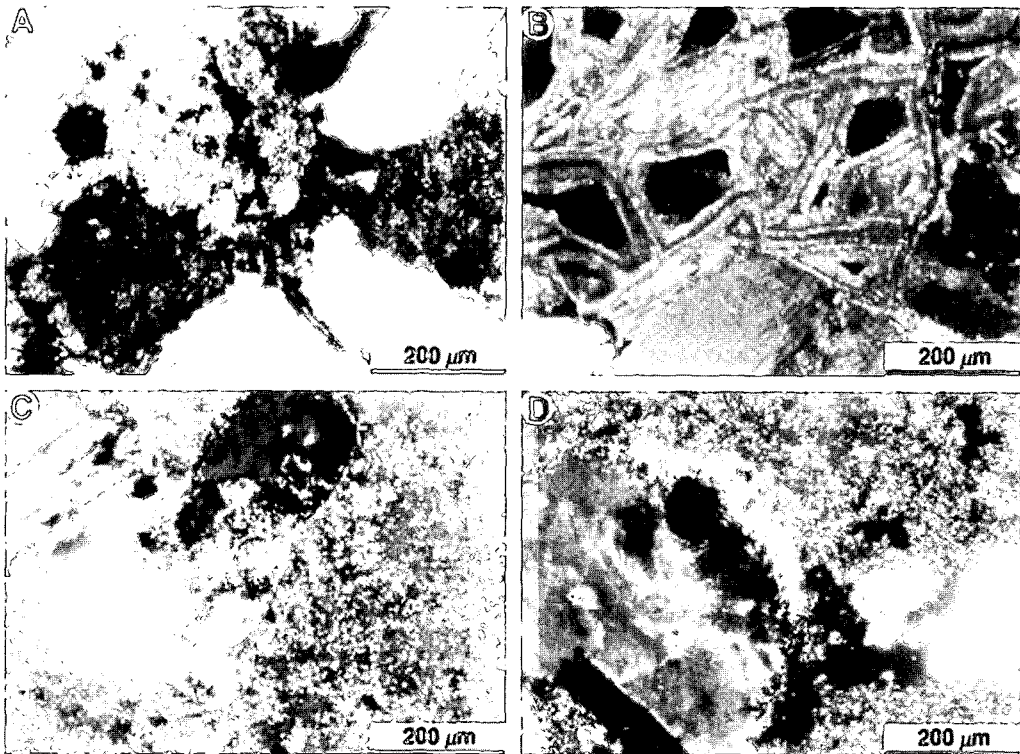


Fig. 3. Microphotographs showing weathered host rocks showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. (A) Micrographic texture composed of quartz and alkali feldspars which show highly clay mineralization. (B) Amorphous colloidal iron hydroxides in the cavity of rock forming minerals. (C) Plagioclase and biotite altered to clay minerals along the phase boundaries. (D) Secondary clay minerals occurred along the twin plane of plagioclase and biotite in the basic xenolith.

및 희토류 원소의 분석결과는 Table 1과 같이, SiO₂가 66.58~68.10 wt.%로서 거의 균질한 조성을 보이며 Al₂O₃의 함량도 15.47~16.17 wt.%로서 전형적인 화강 섬록암의 범주를 나타낸다. 또한 Na₂O와 K₂O의 함량은 각각 0.03~4.23 wt.%, 2.74~2.98 wt.%이며 Fe₂O₃

Table 1. Chemical compositions of major elements (wt.%), minor and rare earth elements (ppm) for host rocks of the West pagoda, Gameunsaji temple site.

	GE-1	GE-2	GE-3	GE-4	GE-5	GE-6	TG-1 ⁴⁾
SiO ₂	68.10	67.33	67.88	66.58	67.42	67.72	67.37
Al ₂ O ₃	15.65	16.17	15.91	15.87	15.99	15.47	15.17
Fe ₂ O ₃ ¹⁾	3.28	3.68	3.42	3.24	3.38	3.56	3.42
MnO	0.09	0.07	0.09	0.06	0.09	0.05	0.06
MgO	0.77	0.71	0.75	0.67	0.62	0.79	1.40
CaO	2.90	3.09	2.72	3.00	3.16	2.88	3.12
Na ₂ O	4.14	4.23	0.03	3.93	4.22	3.56	3.89
K ₂ O	2.88	2.95	2.86	2.74	2.84	2.98	2.63
TiO ₂	0.34	0.40	0.37	0.35	0.34	0.43	0.44
P ₂ O ₅	0.18	0.25	0.08	0.17	0.20	0.24	0.13
LOI	1.93	1.62	2.19	2.45	1.88	2.79	0.90
Total	100.27	100.50	100.29	99.06	100.15	100.48	98.51
CIA ²⁾	50.73	50.63	52.03	51.60	50.36	51.93	50.43
WPI ³⁾	4.13	5.58	2.78	1.83	4.46	0.34	8.88
Ba	796	857	799	785	763	838	452
Be	2	2	1	2	2	1	0.5
Co	6	7	8	10	5	9	12
Cs	3	2	3	3	3	4	3
Cu	9	3	7	7	3	23	11
Hf	5	5	5	5	5	5	0.1
Pb	20	14	18	18	19	23	10
Rb	70	86	92	95	85	89	154
Sc	5	6	5	5	5	6	7
Sr	395	425	395	405	417	406	403
Th	12	13	13	12	12	15	8
U	2	3	2	2	2	2	2
Y	15	18	14	20	18	17	14
Zn	62	39	47	45	42	46	55
Zr	165	183	167	164	168	208	24
La	36	41	39	48	43	44	13
Ce	63	69	53	68	65	67	28
Nd	24	27	28	31	27	32	11
Sm	3.7	4.6	4.0	5.4	4.6	5.3	2.8
Eu	1.0	1.2	1.1	1.3	1.2	1.4	0.9
Tb	<0.5	0.5	0.5	<0.5	<0.5	0.5	0.3
Yb	2.0	2.5	2.1	2.5	2.3	2.4	0.9
Lu	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2

Fe₂O₃¹⁾; as total FeO, CIA²⁾; chemical index of alteration by Nesbitt and Young (1982), WPI³⁾; weathering potential index by Nesbitt and Young (1982), TG-1⁴⁾; average chemical composition of Tohamsan granodiorite (Lee and Hwang, 1999).

의 함량이 3.24~3.68 wt.%로서 중성에 가까운 산성 화성암에 속함을 알 수 있다. 이 분석치는 심하게 풍화작용을 받은 암편에 관한 조성으로서 암석의 화학적 진화를 설명하기에는 많은 문제가 있음을 내포하고 있는 것이다.

일반적으로 SiO₂의 함량이 증가함에 따라 Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO 및 TiO₂의 함량은 부의 상관도를 보였으며 K₂O의 함량은 정의 관계를 갖는다. 그러나 Na₂O의 함량은 특별한 경향을 보이지 않았다. 이는 화성암의 일반적 경향과 풍화에 의한 상대적인 소실효과가 반영된 것으로 판단된다. 또한 암석의 조성에 따른 차이가 확실하게 나타난다. 이와 같은 원소의 거동과 지구화학적 특성은 고찰에서 별도로 논의하기로 한다.

이 암석의 미량 및 희토류 원소 분석결과는 Table 1과 같이 Ba, Rb, Y, Zn, 및 Zr의 함량은 비교적 높은 함량을 가지며 조성의 변화폭도 크다. 그러나 대부분의 미량원소는 낮은 함량을 보이고 조성변화도 작음을 알 수 있다. 이 미량원소의 함량변화를 SiO₂의 조성변화로 나타내면 Ba, Co, Eu, Sr, Zn 및 Sc의 조성은 SiO₂의 증가에 반하여 감소하는 경향이 있으며 Be, Hf, Yb, Rb의 조성은 증가하는 경향을 갖는다. 그러나 특별한 경향성을 보여주지 않는 원소도 있다. 이들은 일반적인 화성암의 분화경향을 반영하는 것이나, 이 자료를 가지고 암석의 성인과 생성환경을 논하기는 불충분하다.

4. 풍화 및 훼손도 진단

4.1. 기계적 풍화와 훼손

감은사지 서탑의 암석학적 훼손에 가장 큰 문제가 있는 부분은 각층의 옥개석과 기단부의 박리와 박락으로 인한 암석강도의 약화이다(Fig. 4). 이는 강수와 직사광선 및 해수분무의 영향이 강할 것으로 보이는 동남쪽의 부재에서 상대적으로 심하게 발생되어 있어, 이미 토양화가 진행되어 있다. 이는 현재 상태로는 어떠한 보존처리도 효과를 발휘하기 곤란한 상태이기 때문에 암석학적으로 동일한 부재를 선택하여 보강해야 할 처지에 있는 것도 많다. 이와 같이 기상변화에 제일 민감한 쪽에 노출되어 있는 부재의 차별훼손은 탑의 구조상 피하기 어려운 문제이다.

이 탑에 나타난 대표적인 기계적 훼손과 물리적 풍화현상은 Fig. 4와 같이, 부재의 파손과 균열 및 이격 등이다. Fig. 4A는 옥개석의 가장자리가 사각형으로 탈

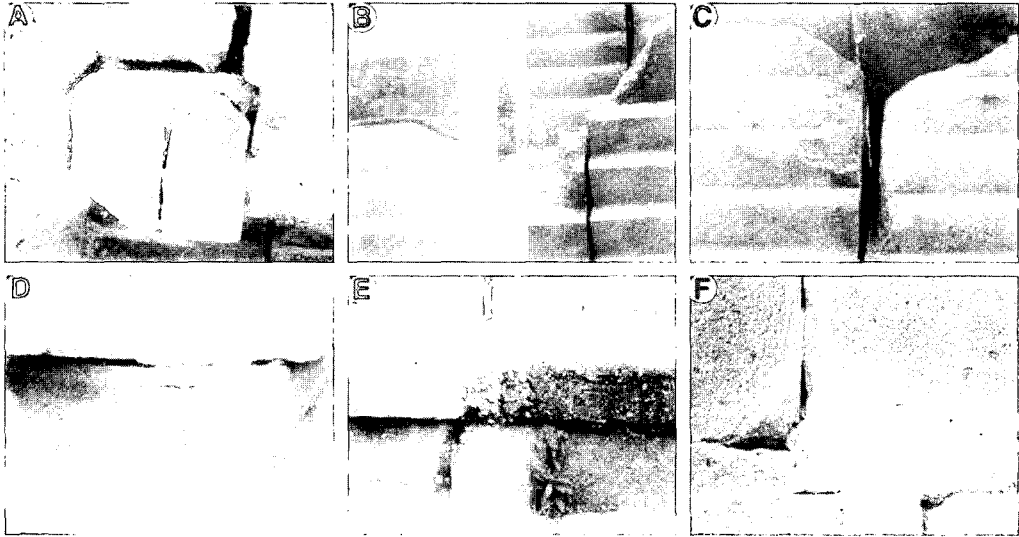


Fig. 4. Deterioration degree showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. (A) Highly fractured roof rock of the 3rd floor. (B) Broken-out roof rock of the 2nd floor. (C) Loss of roof supporting rock of the 2nd floor. (D) Coner stone of the basement shows partly falling off the rock block. (E) Some basement rock substituted with concrete which is intruded weeds. (F) Vertical crack and crusts occur into cement treated basement rocks.

락되어 일부를 콘크리트로 접합한 부분이고, Fig. 4B는 옥개석과 받침대가 파괴되어 멸실된 부분이다. 또한 탑신과 옥개석 사이, 기단석의 모서리 부분은 어느 장소를 막론하고 심하게 파괴되어 있다(Fig. 4C, 4D). 한편 일부 지대석은 완전히 멸실되어 있으며 탑신과 접

하는 멸실 부분은 콘크리트 또는 시멘트 몰탈로 보강하였다(Fig. 4E, 4F). 그러나 이 보강부분도 심하게 훼손된 것이 대부분이다.

이 탑은 변형정도도 심하여 부재가 접하는 부분은 원형을 상실한 경우가 많다. Fig. 5A는 찰주를 지지하

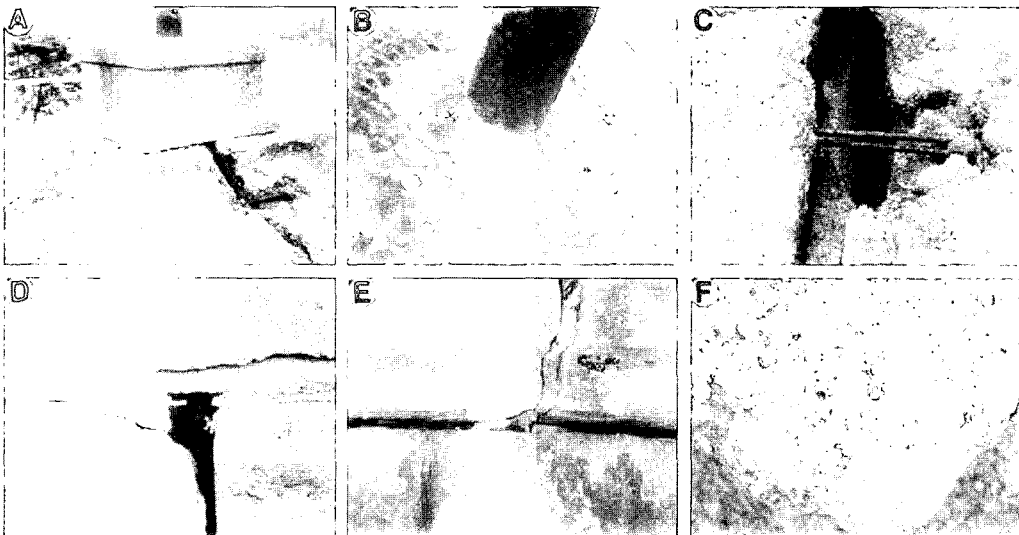


Fig. 5. Deformation states and surface contamination showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. (A) Distortion of the uppermost property on the fractured roof rocks. (B) Iron hydroxides coated by oxidation of iron pipe. (C) Wide gap between the each block of 3rd floor roof stone are bolted iron wires. (D) Open cavity filled with cement mortar between each rock blocks. (E) Iron plates and rock chips jammed open space of the blocks which are covered with dark brown precipitates. (F) Leafy lichen coated roof coner rock shows breaking bronze ornamentation.

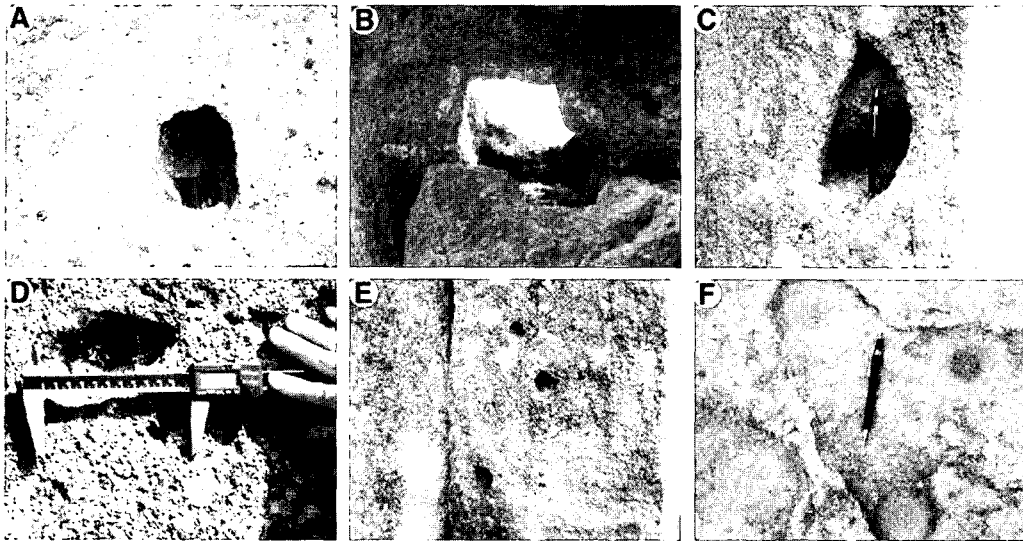


Fig. 6. Various open cavities showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. Photographs A, B, C and D are variable large open cavities because of differential weathering between host rock and basic xenolith. Photographs E and F are small holes developed in the basement rocks due to artificial works.

는 노반석이 옥개석과는 마름모꼴로 어긋나 있다. 이 노반은 화강섬록암이긴 하나 암상과 풍화도가 탑계의 암석과는 전혀 다른 것이며, 이 철주를 고정시킨 시멘트 몰탈은 황갈색 철산화물로 피복되어 있다(Fig. 5B). 옥개석을 고정하기 위해 무쇠로 접합하였던 곳이 파손되어 콘크리트 충전물이 드러나 있으며(Fig. 5C), 탑신 사이를 연결한 무쇠 장식과 표면박락 및 시멘트 몰탈의 처리부위가 그대로 노출되어 있다(Fig. 5D, 5E). 이런 부위에는 적갈색 및 회백색 침전물이 산재한다. 또한 옥개마루에 있는 청동제 장식물은 흔적만 존재할 뿐이다(Fig. 5F).

한편 탑의 본체를 이루고 있는 부재에는 크고 작은 공동이 산재한다(Fig. 6). 이 공동의 대부분은 상대적으로 풍화에 약한 염기성 포획암이 용해되어 소실된 자리로서, 외면부재에서는 소실되어 깊은 홈을 만들었고 일부 옥개석에서는 완전한 공동을 이루고 있다(Fig. 6A, 6B). 그러나 일부는 약간 남아있어 이 부분이 염기성 포획암 인 것을 증명해 준다(Fig. 6C, 6D). 또한 기단석과 지대석의 표면에는 4~5cm 정도의 둥근 홈이 산재한다(Fig. 6E, 6F). 이는 주민과 관광객들에 의해 인위적으로 훼손된 흔적으로서 흔히 기자공으로 불리는 것들이다. 이 부분에서도 박락과 표면요철이 발생하고 있다.

이를 종합하여 감은사지 서탑의 각 면에 대한 입면 실측도와 훼손현황을 기재하였다. 동측 입면도를 보면

Fig. 7A와 같이 지대석과 기단부의 부재가 접하는 부분의 모서리는 거의 모두 파손되어 있거나 마모되어 있다. 각 층의 탑신과 옥개석이 접하는 부분에서 이격과 함께 부재의 멸실이 발생하였다. 특히 강수의 침입을 가장 강하게 받는 옥개석의 상하부 갑석에서 박락과 탈락이 심하여 각각의 부재 사이에는 시멘트 몰탈과 콘크리트로 충전하여 놓았다. 이는 거의 모든 방향에서 동일하게 발생한 현상으로서, 남쪽 면에서 가장 심한 훼손상태를 보인다(Fig. 7B). 모든 부재의 훼손상태는 상세히 기록되어 있다(경주시, 2001).

이 탑의 평면을 이루는 지대석과 각 층의 옥개석에 대하여도 Fig. 8과 같이, 훼손상태 지도를 작성하였으며 상세한 실측도를 만들었다. 지대석은 이미 소실된 부재가 많으며 부재 사이의 모서리는 거의 모두 깨진 상태이다. 또한 염기성 포획암의 소실로 인한 공동과 인위적인 훼손이 심각한 상태이다(Fig. 8A). 각층의 옥개석은 거의 모든 모서리가 깨져 있고 불규칙한 균열이 사방으로 발달하였으며 1층과 2층 옥개석에서도 이미 깨져 나간 흔적과 공동이 있다. 3층 옥개석은 박리와 박락이 가장 심하여 무쇠장식, 콘크리트 및 시멘트가 넓은 이격에 그대로 드러나 있다(Fig. 8B). 또한 노반도 뒤틀어져 있는 등, 대부분의 암석은 보수가 어려울 만큼 심하게 훼손되어 교체가 불가피한 상황이다. 이에 관한 상세한 내용과 부재별 이격거리 및 박리와 절리의 발달상태는 상세하게 정리되어 있다(경주시, 2001).

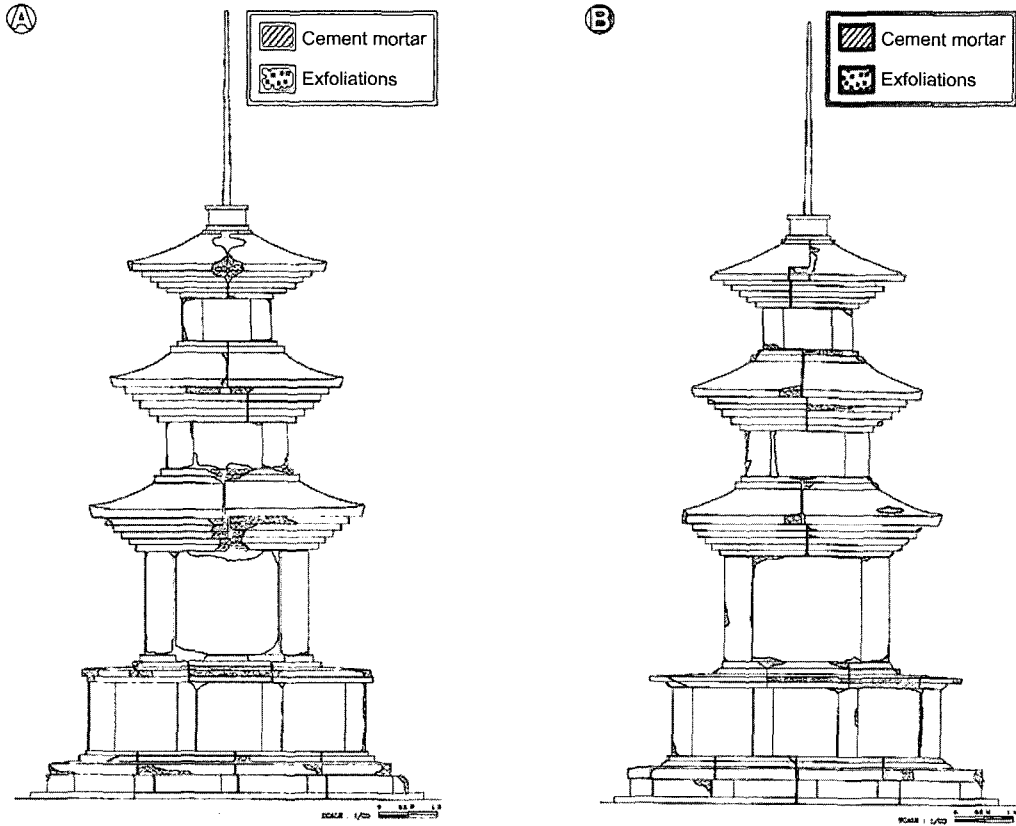


Fig. 7. Representative detailed deterioration sketch for eastern part (A) and southern part (B) showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site.

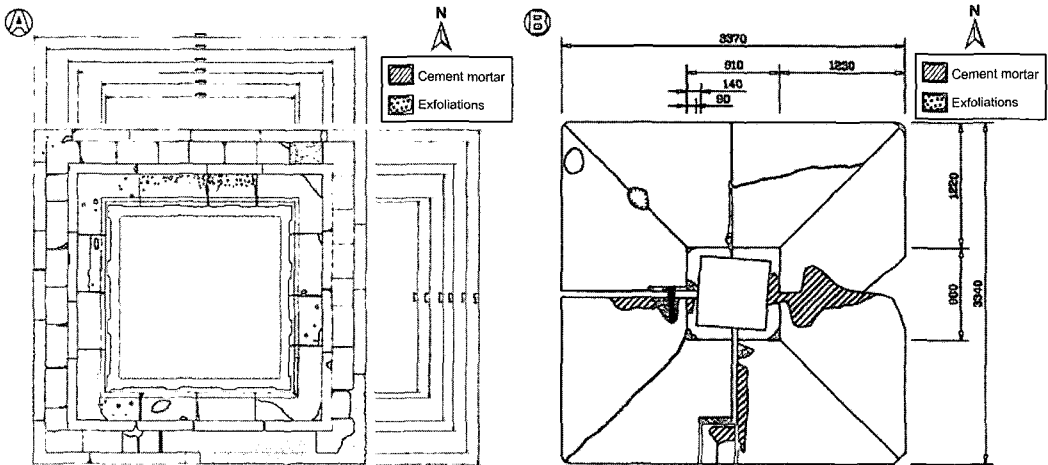


Fig. 8. Representative detailed deterioration sketch for lower basement properties (A) and 3rd floor roof rocks (B) showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site.

4.2. 화학적 및 미세조직 분석과 진단

암석의 화학적 및 광물학적 풍화는 여러 가지 요인이

복합적으로 작용하여 구성성분 및 조직을 파괴한다. 화강암류의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및

결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(chemical index of alteration; CIA)와 풍화잠재지수(weathering potential index; WPI)를 구할 수 있다(Nesbitt and Young, 1982; 1984). 일반적으로 풍화지수는 유동성이 작은 Al_2O_3 에 대한 알카리 원소의 변화를 나타내는 것으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 지시한다. 풍화잠재지수는 0을 기준으로 양의 값을 보이면 화학적인 풍화작용에 민감하다는 것을 지시한다.

이 탑재의 CIA는 50.36~52.03(평균 51.21)로서 거의 균질하며 토함산의 화강섬록암에 비하여 약간 높을 뿐이다. 또한 WPI는 0.34~5.58(평균 3.19)로서 약간의 편차가 있으나 토함산 화강섬록암에 비하여 현저히 낮다(Table 1). 이 결과는 현재 이 암석의 화학적 풍화작용이 왕성하게 발생하는 정도로 풍화잠재력이 높은 것도 아니다. 이는 분석에 이용된 감은사지 석탑의 암석이 충분한 풍화작용을 거쳐 이미 원소의 증감현상이 반영된 것으로 해석할 수 있다.

이 암석을 편광현미경으로 관찰하면, 대부분의 장석류는 견운모와 고령석으로 변질되어 있음을 보여준다. 흑운모도 입자경계나 벽개면을 따라 녹니석, 녹염석 및 철수산화 광물로 교대된 것을 볼 수 있다. 이를 전자현미경에서 보면 장석들은 용식에 의하여 많은 공극이 발달된 것을 볼 수 있고, 특히 시멘트 물탈이 용해되어 회백색 침전물을 형성한 곳에서는 석고의 도면상 결정

과 능면상의 방해석 결정들을 관찰할 수 있다(Fig. 9A, 9B). 또한 조암광물의 공극과 입간에는 이차적으로 생성된 다양한 결정형을 갖는 스멕타이트 및 불석군의 광물을 관찰할 수 있다(Fig. 9C, 9D). 또한 장석의 경계에서는 고령석과 지의류 및 조류의 뿌리와 균사체로 보이는 유기물이 뒤엉켜 산출된다(Fig. 9E, 9F).

이 광물들의 대부분은 현미경하에서 관찰되는 미세 열극을 따라 생성되어 부피를 팽창시키고, 규산과 물을 흡수하거나 용출시켜 광물의 이차반응을 촉진시키는 용매역할을 한다. 이는 육안으로는 드러나지 않는 광물학적 및 화학적 풍화작용이 끊임없이 진행되고 있다는 것을 지시하는 것이다. 또한 암석의 표면과 절편 및 무쇠가 삽입된 부분에서는 이들의 이차적인 산화에 의해 생성된 것으로 보이는 황갈색 산화물이 피복되어 있으며 암흑색 표면변색도 일반적이다.

4.3. 생물학적 오염

미생물이 석조물의 표면에 부착하게 되면 생물막의 특성상 다양한 조류와 하등식물의 포자가 부착할 수 있으며, 이들의 활동에 의해 보습력이 높아져 하등식물의 생장에 필요한 수분을 제공하게 된다. 또한 지의류의 표면 번식이 시작되며 이후 뿌리를 갖는 선태류와 수근의 침입이 일어나게 된다(Young and Urquhart, 1998; Lisci *et al.*, 2003). 보통의 식물체 뿌리는 토양

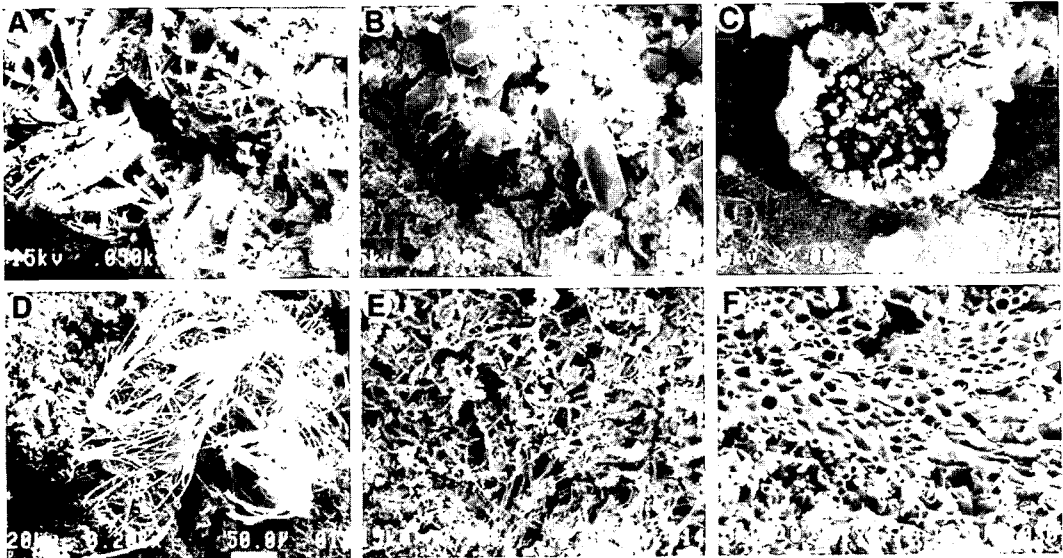


Fig. 9. Scanning electron microphotographs (SEM) for secondary minerals and organic matters showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. (A) Secondary bladed gypsum shows light gray precipitates under the roof stone. (B) Calcite and gypsum formed with boundary between cement mortar and host rock. (C) Smectite aggregate occurred with the upper part rocks. (D) Fibrous zeolite from boundary between feldspars. (E) Rootlets of lichen and algae occur with the grain boundary of host rock. (F) Fungus section of lichen grown into the the roof rock.

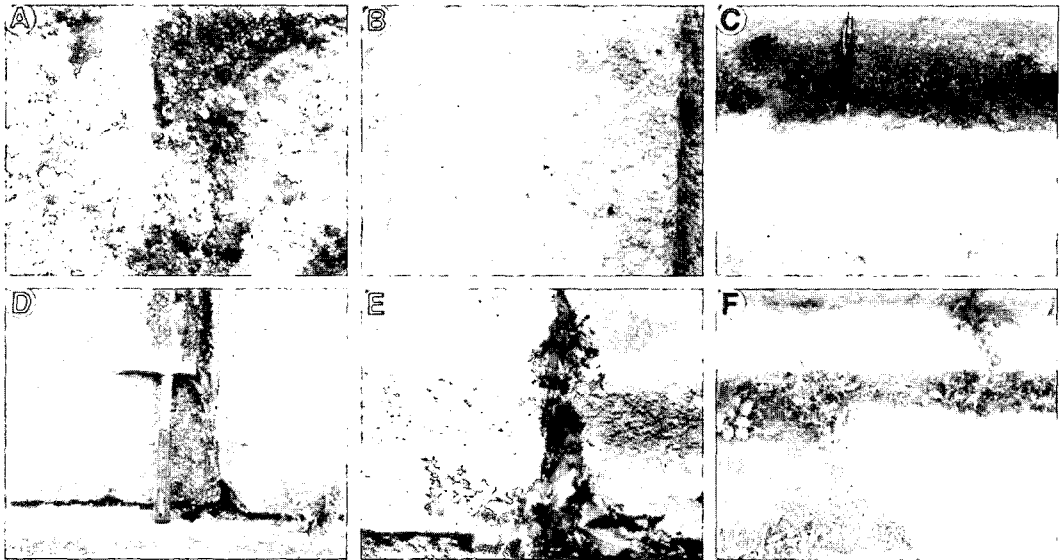


Fig. 10. Biological deteriorations showing the West pagoda of the Gameunsaji temple site. (A) Light grey leafy lichen grew on the roof rocks. (B) Green algae and lichen aggregate covered on the basement rock. (C) Black bryophytes coated rocks between the basement and ground properties. (D) Some moss and weeds observed under the body supporting roof rock. (E) Dandelions grew on the blocks of basement rocks. (F) Weeds grew naturally between ground and ground rocks.

또는 암석에 근압을 가하며, 뿌리 끝에서는 극산성 분비물을 발생시켜 암석을 부식시키는 강력한 화학적 풍화작용을 초래하며, 식물의 호흡작용과 증발작용도 화학적 풍화에 중요한 역할을 한다(Billings, 1950; Brooks, 1972).

이 서탑은 생물학적 오염이 가중되어 있으며 균류, 조류 및 지의류들이 암석의 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출된다(Fig. 10). 이들이 성장을 멈추면 암흑색 또는 흑갈색으로 변색되어 미관을 해치는 것은 물론 암석의 풍화도 촉진시키는 것이다. 지의류의 피도는 면석에서는 전체적으로 50% 정도이나, 옥개석은 90% 이상으로서 부착생물의 오염이 심각하다(Fig. 10A, 10B). 한편 직사광선을 직접적으로 받지 않고 상대습도가 비교적 높은 장소에서는 이끼 및 고사리들이 기생하기도 한다(Fig. 10C, 10D).

Fig. 9E와 9F는 옥개석을 이루는 암석의 표면에서 관찰되는 유기물의 전자현미경 사진이다. 옥개석의 표면으로부터 2cm 깊이의 시료에도 조암광물의 공극에서는 2~3 μ m 정도의 두께를 갖는 지의류의 포자근과 균사(Crustose lichen's rhizoid)가 서로 엉켜있다. 또한 석영과 장석의 입간 공극을 침투한 지의류의 포자근과 균사가 이차적으로 생성된 점토광물과 결합되어 조암광물의 입간을 충전하는 등, 아주 다양한 형태의

생물학적 풍화현상을 관찰할 수 있다. 이 부위의 암석은 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화도 심하게 진행되어 있어 약한 충격에도 쉽게 떨어진다.

토양화의 깊이를 나타내는 심도는 남조류, 지의류 및 선태류의 번식에 의해 암석의 표면이 얼마나 침식을 당하였는지 여부를 보여주는 지표가 된다. 이 탑의 토양화 심도는 옥개석의 경우 5mm가 넘고 측면과 배면은 1~2mm 정도로서 이 생물들이 제거될 때 암석의 인위적인 풍화도 감소해야 할 것이다. 한편 기단부에는 이미 잡초의 침입이 심각한 상태이다(Fig. 10E, 10F). 따라서 식물체에 의한 기계적 풍화를 가속시키고 있어, 이에 대한 대비가 있어야 할 것이다.

5. 보존과학적 고찰

5.1. 석재의 산지추정

일반적으로 화강암류의 풍화환경에서 주성분 원소의 상대적인 거동을 표현하기 위해 흔히 Al_2O_3 , TiO_2 및 Fe_2O_3 중에 하나를 고정성분으로 사용한다(Murphy *et al.*, 1998). 그러나 이 탑 주변의 풍화단면에는 다량의 점토광물이나 산화철 광물들이 생성되어 있으므로 이들을 고정성분으로 풍화에 의한 원소의 거동을 설명하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서는 감은사지 서탑 부재의 주성분 원소에 대하여 부화와

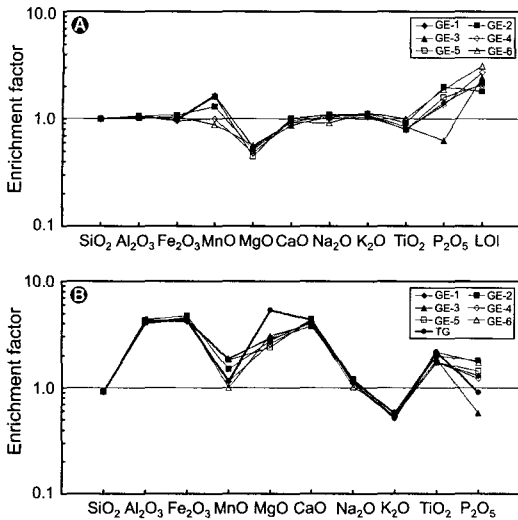


Fig. 11. Diagrams showing enrichment factors, normalized by average composition of Tohamsan granodiorite (A) and mean value of standard granite (B) for the West pagoda of the Gameunsaji temple site. Sample numbers are the same as those of Table 1.

결핍정도를 비교하고자 이준동과 황병훈(1999)이 보고한 토함산 화강섬록암의 평균조성 및 일반적인 화강암의 평균 함량(Nockolds and Allen, 1954)을 기준치로 표준화하였다(Fig. 11).

이 부화계수(enrichment factor)는 1을 기준으로 높은 값은 부화를 낮은 값은 결핍을 의미한다. 이 서탑 구성암석의 조성을 토함산 화강섬록암의 조성으로 표준화한 결과, 모든 원소의 진화경향은 동일한 양상을 보였으나, 토함산 암석에 비하여 MgO는 다소 결핍되어 있으며 P₂O₅와 LOI는 다소 부화된 경향을 나타냈다(Fig. 11A). 동일 암종에서 편차가 발생한 것은 풍화도의 차이를 반영하는 것으로 보인다. 이 시료들을 Nockolds and Allen (1954)의 조성으로 표준화 하였을 때, 모든 시료에서 SiO₂와 K₂O 및 일부 P₂O₅를 제외한 모든 원소가 부화되어 있다. 또한 MgO를 제외한 모든 원소가 토함산 화강섬록암과 동일한 함량변화와 거동특성을 갖는 것으로 보아(Fig. 11B), 양자의 성인적 동질성이 인정된다.

이 암석들의 일부 미량 및 희토류 원소의 함량은 동일 종류의 화강섬록암과 거의 비슷한 특징을 갖는다. 그러나 이 자료를 토대로 암석학적 및 지구화학적으로 암석의 기원과 진화경향을 설명하는 것의 큰 의미가 없을 것으로 보인다. 따라서 주성분 원소와 동일한 방법으로 일부 미량 및 희토류 원소의 진화경향을

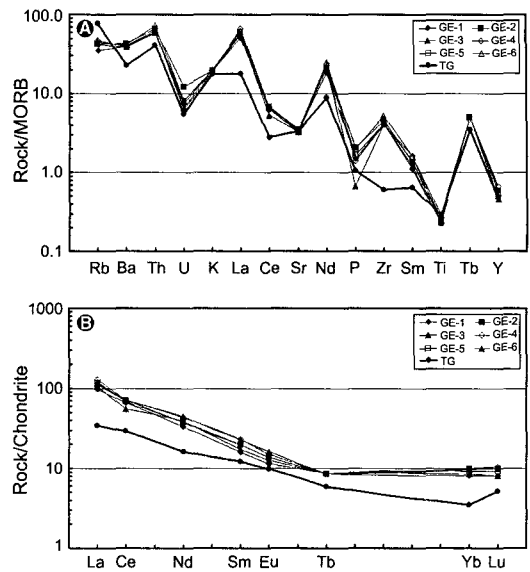


Fig. 12. Diagrams showing normalized patterns by composition of mid-oceanic ridge basalt (A) and rare earth element of meteorite for the West pagoda of the Gameunsaji temple site. Sample numbers are the same as those of Table 1.

Pearce (1983)의 조성으로 표준화 한 결과(Fig. 12A), 모든 시료에서 동일한 경향을 보였다. 또한 토함산의 화강섬록암과도 일부 원소(La, Zr)를 제외한 거의 모든 원소의 거동특성이 동일하였다. 한편 이 시료의 일부 희토류 원소 함량을 Boynton (1984)의 조성으로 표준화 하였을 때, Fig. 12B와 같이 모든 시료에서 동일한 분화경향을 보였으며, 토함산 화강섬록암과도 조성도 동일한 경향을 보였으나 다소 결핍된 특징이 나타났다.

전암 대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로 이미 잘 알려져 있다. 대자율을 통해 자철석을 함유한 화성암의 광역적 분포를 파악할 수 있기 때문에 1.256을 기준으로 이보다 높은 경우는 자철석 계열로, 낮은 경우는 티탄 철석 계열의 암석으로 구분 한다(Ishihara, 1998). 또한 캄보디아 앙코르 사원의 부재 연구에도 적용된 바 있으며 다각적인 성인적 해석도 실시하였다(Uchida *et al.*, 1998; 1999).

좌용주 등(2000)은 암석의 성인적 특성에 따라 서로 다르게 나타날 수 있는 전암대자율을 측정하여 불국사와 석굴암 및 주변의 암석에 관한 분류를 시도하였다. 이 결과, 다보탑과 석가탑의 부재는 거의 동일한 특성을 가지고 있으며 암석학적으로 볼 때 남산화강암과 가장 유사함을 주장하였다. 또한 석굴암의 구성암석과

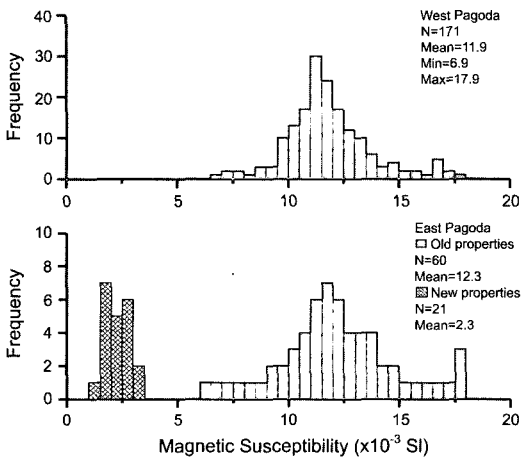


Fig. 13. Histogram showing magnetic susceptibility ($\times 10^{-3}$ SI unit) of host rock for the West pagoda of the Gameunsaji temple site.

토함산의 화강섬록암이 동일한 종류의 암석임을 보고 하였다. 이 연구에서 측정된 감은사지 서탑 부재의 전암대자율은 6.9~17.9($\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위이며 171개 측정값의 평균은 11.9 이다(Fig. 13). 한편 감은사지 동탑의 전암대자율도 평균 12.3 정도로서 서탑과 거의 동일한 값을 갖는다.

이는 좌용주 등(2000)이 보고한 석굴암의 구성암석 및 토함산 화강섬록암의 자료와 거의 일치하는 것이다. 그러나 동탑의 보수공사 과정에서 삽입된 신부재의 대자율 값은 평균 2.3으로서 암석학적 성인이 전혀 다른 부재가 사용되었음을 보여준다(Fig. 13). 따라서 위의 결과들을 종합할 때, 감은사지 서탑의 부재와 토함산 화강섬록암은 생성환경이 아주 유사한 암석임이 판명되었으며, 산출상태와 기계적 특징으로 보아 토함산의 동쪽 연변에 분포하는 암석이 가장 유사할 것으로 판단된다.

5.2. 환경 및 구조적 훼손요인

감은사지 서탑은 오랜 세월동안 강수, 대기 중의 수분, 해수분무와 반송해 왔기 때문에 표면풍화가 아주 심하다. 또한 암석자체가 상대적으로 풍화에 약한 염기성 포회암을 가지고 있어 그 부분이 용해되어 탑신과 옥개석에 많은 공동을 형성하였다. 부재의 거친 표면은 유색광물(각섬석과 흑운모) 및 장석(정장석, 미사장석, 퍼사이트 및 사장석)이 있던 자리로서 광물조직이 이완된 전형적인 입상분해 작용의 증거이다. 따라서 여기에서 분비되는 무기염류가 하등식물에 양분을

공급하고 훼손된 조직의 결합은 서식장소를 제공하게 되어 고등식물로 까지 천이를 일으키게 된 것이다. 겨울에는 수분의 결빙과 해동이 반복되면서 암석을 기계적으로 파괴할 것이며, 동해에서 유입될 수 있는 해수분무의 결정화도 피할 수 없는 문제점이다.

또한 탑의 주변에 피복된 점토질 토양의 수분이 기단부를 따라 상승하기도 하며, 증발과정에서 잔류물을 침전시킨다. 한편 삼층 옥개석의 부재사이에는 이미 멸실된 부분이 노출되어 있으며 상호 간격도 넓게 나타나 있어 강수침투를 막을 수 없는 등, 자연적 환경요인을 차단하기는 극히 어려운 상태이다. 보호각을 지어 관리하기 이전에는 탑에 영향을 미치는 모든 수분의 유지시간을 최대한 단축시키는 것이 필요하다. 특히 상대적으로 바다 바람과 강수의 침입 및 직사광선을 많이 받게 되는 동남쪽의 부재에서 풍화도가 극에 달해있으며 침전물과 자생한 결정질 광물 및 하등생물도 번성하고 있다. 이를 방지하기 위한 부재표면의 방수처리도 고려해야 한다.

감은사지 서탑의 지반에 관하여는 서만철 등(2003)의 연구결과가 있어 여기에서는 논의하지 않기로 한다. 이 탑은 특별한 구조적 불안요인은 없는 것으로 판단되나 암석학적 훼손에 가장 큰 문제가 있는 기단부는 박리와 박락으로 인한 암석강도의 약화가 상부의 부재를 건디기 어려운 상황이다. 이 부분이 상대적으로 심하게 훼손된 것은 기상변화에 제일 민감한 쪽에 노출되어 있기 때문이다. 따라서 동남쪽의 부재가 상대적으로 심한 풍화가 발생하여 암석이 박리와 박락되어 있으며 부분적으로는 이미 토양화가 진행되어 있다. 현재 상태로는 어떠한 보존처리도 효과를 발휘하기 곤란한 상황이기 때문에 석조문화재 보존처리용 충전제, 경화제 및 표면처리제로 보강하거나 암석학적으로 동일한 부재를 선택하여 대체해야 할 처지에 있다.

5.3. 보강 및 보존처리 방안

감은사지 서탑의 풍화현상은 여러 원인이 복합적으로 작용한 결과이며 가장 중요한 문제는 동남쪽 기단부 및 각 층의 옥개석에 발생한 박락과 멸실, 공동화 현상 및 부재의 균열이다. 또한 상대적으로 풍화에 약한 광물의 분해와 용해, 박리현상에 따른 차별풍화, 모서리의 마모와 미세균열 및 이끼류에 의한 생물학적 풍화 등이 많이 관찰된다. 2차적인 것으로 탑의 구조적 불균형에 해소하기 위해서 끼워 놓은 철판과 무쇠 및 벌어진 틈을 메운 콘크리트와 시멘트 및 다른 몰탈에 의한 부식과 산화작용으로 풍화가 촉진된 것 등 여

러 가치를 들 수 있다. 이 탑에서 가장 문제가 되는 부분은 북쪽의 지대석과 기단부의 부재가 접하는 모서리, 각 층의 탑신과 옥개석이 접하는 부분으로서 이격과 함께 부재의 멸실이 발생하였다.

국내에서도 일부 석조문화재의 풍화훼손도 평가와 이를 기초로 한 보존처리 및 보존방안에 관하여는 이미 논의된 바 있다(이찬희 등, 2000; 최석원과 이찬희, 2000; 최석원 등, 2001; 이찬희 등, 2001; 이찬희와 서만철, 2002; Lee *et al.*, 2003; 이찬희 등, 2003). 이 탑의 향후 보존처리 연구에서는 이 탑의 진단에서 드러난 모든 풍화와 훼손요인을 지속적으로 감시하고 장기적인 계획을 수립하여 진행해야 할 것이다. 특히 부재의 이격, 모서리 마모와 미세균열의 크기는 계속적인 모니터링과 함께 암석용 충전제를 사용한 경화처리를 위한 임상실험이 이어야 할 것이다. 심하게 훼손되어 하중의 지지강도에 문제가 될 수 있는 탑신의 구성암석은 대체암석과 함께 공학적 보강방법도 고려해야 한다. 또한 표면에 피복된 부착생물을 제거하기 위한 관리방안도 요구되며, 이에 관한 연구사례도 알려져 있다(Young and Urquhart, 1998; 양희제 등, 2003).

이 탑에 나타난 이차적 오염현황은 황갈색 수산화철에 의한 암석의 변색과 강수의 유동흔적을 따라 나타나는 암회색 침전물, 탑의 이격에 삼입된 철편, 옥개석과 주변에 쌓인 각종 오물의 잔재물이다. 이들은 먼저 증류수에 의한 세정이 필요한 부분이다. 표면산화 및 철편의 산화에 의한 적갈색 침전물과 피복물질의 제거는 조연태 등(2001)에 보고된 바 있으나, 이 녹은 암석 깊게 침투되어 완전한 제거가 불가능할 것으로 예상되기 때문에 먼지와 오염물질 및 침전물은 정기적인 관리가 필요하다.

석조문화재의 보존처리에는 외관을 훼손하지 않도록 충전제와 발수경화제 등의 보수용 접착제로 시공하는 것이 일반적이며, 풍화된 석재의 표면을 강화시키는 것으로는 에틸 실리케이트(ethyl silicate)가 효과적인 것으로 알려져 있다. 이에 관한 실제적용과 문제점도 이미 보고된 바 있다(김사덕 등, 1999; 엄두성 등, 1999). 한편 과거 석조물의 이전이나 복원과정에서 부재의 고정과 수평을 맞추기 위하여 무쇠가 주로 사용되었다. 그러나 이들이 부식되면서 철산화물들이 석재 표면의 오염을 가속시키고 있어 이러한 문제점을 해결하기 위해 티타늄 또는 텅스텐 강철 합금을 이용한 예도 잘 알려져 있다(조연태 등, 2001). 그러나 석조문화재 보존을 위한 약제의 선정과 적용은 석재의 풍화원

인 및 부식의 메카니즘 등에 관한 검증과 임상실험을 거친 후에 적용해야 한다.

6. 결 언

1. 감은사지 서탑의 구성암석은 반상 흑운모 화강섬록암으로서 암회색을 띠나, 풍화면은 담회색 내지 담홍색을 보인다. 탑을 구성하는 부재에는 수 cm 내지 수십 cm의 염기성 포획암이 많이 함유되어 있다. 이 부분은 풍화작용에 의해 크고 작은 공동을 형성하였다.

2. 이 탑의 풍화현상은 지질학적, 기상학적 및 생물학적 원인이 복합적으로 작용한 결과이며, 전반적으로 암석의 강도가 약해져 있다. 탑에서 훼손이 가장 심한 부위는 동남쪽으로서 부재의 박락과 멸실, 공동화 현상 및 균열에 의해 탑의 원형이 거의 상실된 상태이다. 이는 동남쪽이 해변과 인접해 있어 해수분무와 염분의 결정화에 더욱 영향을 받은 것으로 보인다.

3. 부재사이의 생성된 공간에는 철편, 철제 보강재, 암편, 콘크리트 및 시멘트가 충전되어 있으나, 이들의 산화와 부식에 따라 이차적인 오염물질과 침전물질이 산재하며 풍화가 더욱 촉진되고 있다. 거의 모든 부재의 표면에는 지의류와 선대류의 오염이 심각하며, 파쇄대는 토양화의 진행에 의하여 잡초가 암석의 생물학적 풍화작용을 가속시키고 있다.

4. 각층의 옥개석에는 다년생 잡초들이 성장하며 부착생물의 피도는 거의 100%이다. 일부 부재는 표면에서 약 2cm 깊이의 암석내부에서도 조암광물의 공극과 입자경계를 침투한 지의류의 포자근과 균사가 이차적으로 생성된 점토광물과 결합되어 섬유 또는 다발상태로 산출된다. 이와 같은 다양한 형태의 생물학적 풍화작용을 저감하기 위한 생화학적 처리가 필요하다.

5. 석탑의 부재를 새로운 암석으로 교체할 경우를 대비하여, 새로운 석재를 선정하거나 구 부재에 강도를 증가시킬 수 있는 보강제를 연구해야 할 것이다. 본체의 균열이 심한 부분에는 보존처리용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 하며, 풍화와 구조적 불안을 야기하는 지면의 습도를 저감하기 위한 보존방안도 고려되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 지원된 공주대학교 문화재비파괴진단연구실의 연구비로 완성되었음을 명기하며 이에 감사한다.

참고문헌

경주시 (2001) 정밀안전진단보고서; 감은사지 3층석탑(서탑). 공주대학교 문화재보존과학연구소 및 (주)고려구조, 공동연구보고서, 1-186p.

김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 예폭시수지 개발 시험연구. 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20권, p. 139-155.

문화재청 (2004) 문화재 상세정보, 감은사지 삼층석탑. <http://www.ocp.go.kr>.

서만철, 최희수, 이찬희, 오진용 (2003) 감은사지 3층석탑(서탑)의 지반특성을 위한 지구물리탐사. 지구물리, 6권, p. 39-46.

양희재, 정용재, 김사덕, 김광훈 (2003) 익산 미륵사지석탑의 생물침해 장치를 아한 보존처리제 적용실험. 국립문화재연구소, 보존과학연구, v. 24, p. 81-98.

엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 발수경화제 시험연구(I). 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20권, p. 155-173.

이상헌 (1996) 감은사지 삼층석탑(동탑)과 나원리 5층 석탑의 암석과 풍화현상의 특징에 대한 연구. 보존과학회지, 5권, p. 41-68.

이준동, 황병훈 (1999) 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20권, p. 80-95.

이찬희, 서만철 (2002) 대원사 다층석탑의 지질학적 및 암석학적 안전진단. 자원환경지질, 35권, p. 355-368.

이찬희, 최석원, 서만철, 채상정 (2000) 구미 황상동 마애여래입상의 구조적 안정성, 풍화 및 보존방안. 보존과학회지, 9권, p. 21-32.

이찬희, 최석원, 한경순, 원경식 (2001) 경주서악동 삼존불입상의 기계적 훼손과 보존과학적 접근. 지질학회지, 37권, p. 611-627.

이찬희, 이명성, 서만철, 최석원 (2003) 불국사 다보탑의 암석학적 특징과 보존과학적 진단. 지질학회지, 39권, p. 319-335.

최용주, 이상원, 김진섭, 손동운 (2000) 경주 불국사와 석굴암의 석조건축물에 상용된 석재의 공급지에 대하여. 지질학회지, 36권, p. 335-340.

정영호, 손재식, 안장현 (1999) 석탑. 대원사, 130p.

조연태, 김창석, 강대일, 이명희 (2001) 회암사지 선각왕사비 보존처리. 회암사지선각왕사비보존, 국립문화재연구소, p. 11-41.

최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희 (1999) 충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책. 충청남도, 조사연구보고서, 425p.

최석원, 이찬희 (2000) 부여 대조사 화강암 미륵보살입상의 물리적 및 화학적 풍화. 지질학회지, 36권, p. 559-574.

최석원, 이찬희, 남광우 (2001) 선각왕사비의 암석학적 및 물리화학적 특성과 변화연구. 회암사지선각왕사비보존, 국립문화재연구소, p. 43-77.

Billings, W.D. (1950) Vegetation and plant growth as affected by chemically altered rocks in the Western Great Basin. Ecology, v. 31, p. 62-74.

Boynton, W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In Henderson, P. (ed.), Rare

earth element geochemistry, Elsevier, 63-107.

Brooks, R.R. (1972) Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration. Harper and Row, New York, 290p.

Fidler, J. (2002) Stone building, construction and associated component system: their decay and treatment. English Heritage Research Transactions, v. 2, p. 1-104.

Ishihara, S. (1998) Granitoid series and mineralization in the circum-Pacific Phanerozoic granitic belts. Resource Geology, v. 48, p. 219-224.

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 Engineering Geology, v. 21, p. 63-77.

Lee, M.J., Lee, J.I. and Lee, M.S. (1995) Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju area, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v. 31, p. 583-607.

Lisci, M., Monte, M. and Pacini, E. (2003) Lichens and higher plants and stone: a review. International Biodeterioration and Biodegradation, v. 51, p. 1-17.

Murphy, S.F., Brantley, S.L., Blum, A.E., White, A.F. and Dong, H. (1998) Chemical weathering in tropical watershed, Luquillo mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering. Geochimica et Cosmochemica Acta, v. 62, p. 227-244.

Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, v. 299, p. 715-717.

Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. Geochim. Cosmochem. Acta, v. 48, p. 1523-1534.

Nockolds, S.R. and Allen, R. (1954) Average chemical compositions of some igneous rocks. Geol. Soc. Am. Bull., v. 65, p. 1007-1032.

Pearce, J.A. (1983) Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. (eds.), Continental basalts and mantle xenolith, Shiva, 230-249.

Price, C.A. (1996) Stone conservation. An overview of current research. The Getty Conservation Institute.

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., Ogawa, Y., Maeda, N. and Nakagawa, T. (1999) Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia. Engineering Geology, v. 55, p. 101-112.

Young, M.E. and Urquhart, D.C.M. (1998) Algal growth on building sandstone: effects of chemical stone cleaning methods. Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 31, p. 315-324.