

대원사 다층석탑의 지질학적 및 암석학적 안전진단

이찬희^{1*} · 서만철²

¹충남대학교 지질환경학과, ²공주대학교 문화재비파괴진단연구실

Petrological and Geological Safety Diagnosis of Multi-storied Stone Pagoda in the Daewonsa Temple, Sancheong, Korea

Chan Hee Lee^{1*} and Mancheol Suh²

¹Department of Geology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²NRLCP(Non-destructive Research Laboratory of Cultural Properties), Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

The multi-storied Daewonsa stone pagoda (Treasure No. 1112) in the Sancheong, Korea was studied on the basis of deterioration and geological safety diagnosis. The stone pagoda is composed mainly of granitic gneiss, partly fine-grained granitic gneiss, leucocratic gneiss, biotite granite and ceramics. Each rock of the pagoda is highly exfoliated and fractured along the edges. Some fractures in the main body and roof stones are treated by cement mortar. This pagoda is strongly covered with yellowish to reddish brown tarnish due to the amorphous precipitates of iron hydroxides. Dark grey crust by manganese hydroxides occur partly, and some part coated with white grey gypsum and calcite aggregates from the reaction of cement mortar and rain. As the main body, roof and upper part of the pagoda, the rocks are developed into the radial and linear cracks. Surface of this pagoda shows partly yellowish brown, blue and green patches because of contamination by algae, lichen, moss and bracken. Besides, wall-rocks of the Daewonsa temple and rock aggregates in the Daewonsa valley are changed reddish brown color with the same as those of the pagoda color. It suggests that the rocks around the Daewonsa temple are highly in iron and manganese concentrations compared with the normal granitic gneiss which color change is natural phenomena owing to the oxidation reaction by rain or surface water with rocks. Therefore, for the attenuation of secondary contamination, whitening and reddishness, the possible conservation treatments are needed. Consisting rocks of the pagoda would be epoxy to reinforce the fracture systems for the structural stability on the basements.

Key words : multi-storied stone pagoda, reddishness, whitening, fracture system, conservation treatment

대원사 다층석탑(보물 제1112호)의 훼손도 평가와 지질학적 안전진단을 실시하였다. 이 다층석탑의 부재는 주로 화강암질 편마암으로 이루어져 있으며, 부분적으로 세립질 화강편마암과 우백질 화강편마암이 혼재한다. 보륜석은 흑운모 화강암이며 원추형 보주는 도기로 되어 있다. 탑의 부재는 박리와 박락이 심하고 탑신과 옥개석의 일부는 파손되어 시멘트로 조악하게 접착되어 있는 상태이다. 이 탑은 전체적으로 비정질 철수산화 광물의 침전과 피복으로 인하여 황갈색 또는 적갈색을 띤다. 또한 망간산화물에 의한 암갈색 각질과 시멘트 몰탈에서 용해된 석고와 방해석 침전물이 표면의 백화현상을 야기하였다. 각각의 탑신, 옥개석 및 상륜부의 구성암석에는 방사상 또는 선상 미세균열과 이를 충전한 회백색 탄산염광물들이 산재한다. 이 탑에는 균류, 조류, 지의류나 선대류가 암석의 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색 및 진녹색을 나타내는 반점상으로 산출된다. 한편 대원사 경내 및 계곡에 분포하는 암석도 다층석탑과 마찬가지로 심한 적화현상을 볼 수 있다. 이는 대원사 부근에 분포하는 암석이 일반적인 편마암류의 철과 망간 함량에 비하여 아주 높고, 이들이 강수 또는 지표수와의 반응에 따라 산화물을 형성하여 표면을 피복한 자연적인 현상이다. 따라서 이 탑의 이차오염을 가중시키는 적화 및 백화현상을 차단하기 위한 보존처리와 석탑의 부재와 지반의 구조적 안정을 위한 열극계의 보강과 접착이 필요하다.

주요어 : 다층석탑, 적화현상, 백화현상, 열극계, 보존처리

*Corresponding author: chanlee@cnu.ac.kr

1. 서 론

대원사는 경남 산청군 삼장면 유평리 21번지에 있는 참선도량의 하나로서 지리산의 절경과 잘 어우러진 사찰이다. 경내의 사리전 앞에 있는 대원사 다층석탑은 1992년 1월 15일에 보물 제1112호로 지정된 석조문화재로서 2단의 기단 위에 8층의 탑신부를 조성하고 상륜을 장식한 일반형 탑이다. 이 다층석탑은 신라 선덕여왕 15년(서기 646년)에 자장율사가 사리를 봉안하기 위해서 건립한 것으로 알려져 있다. 우리나라의 석조 유물에 대하여 사학적, 고고학적 및 미술사학적 연구는 많이 있어 왔으나 암석의 종류와 지질학적 구조안정성, 암석학적 풍화 및 보존방안에 관한 연구는 미진한 실정이다. 또한 석재 채석장과 공급지 및 공방에 관한 연구도 아직은 근거가 부족하다.

석조문화재의 풍화와 훼손은 근본적으로 물의 영향을 받으며, 물-암석 반응에 따라 풍화잔류물을 남기고 이 잔류물이 결정화되면서 부피가 팽창하여 물리적 또는 화학적 풍화를 진전시킨다. 대부분의 석조문화재와 마찬가지로 대원사 다층석탑도 아무런 보호시설 없이 옥외에 노출되어 있다. 이와 같은 화성암의 지질학적 풍화와 물성변화에 대하여는 이미 국내외의 전문가에 의하여 포괄적으로 논의되어 있다(Chesworth, 1971; Lee and De Freitas, 1989; Drever and Zobrist, 1992; 김영화와 홍순호, 1990). 또한 이 과정에서 제공되는 무기산과 공극은 조류, 선태류, 지의류 또는 고등식물의 서식처를 제공하게 되고 이들의 성장에 따라 기계적 풍화작용은 가속된다. 이에 관한 종합적인 현상도 잘 알려져 있다(Amoroso and Fassina, 1983; Price, 1996; 최석원 등, 1999).

대원사 다층석탑도 오랜 기간 동안 풍화작용을 받아 거의 모든 부분은 황갈색 산화물로 피복되어 있다. 암석 표면은 심한 풍화작용으로 인하여 절리와 균열이 많이 생성되어 있으며 약한 충격에도 암편이 쉽게 떨어진다. 우리나라의 석조문화재에 대한 암석학적 특징과 풍화에 관한 연구는(이상현, 1998; 1999; 좌용주 등, 2000; 이찬희 등, 2000; 2001; 최석원 등, 2001; Lee et al., 2002) 아직까지 시작단계에 불과하다. 이 연구에서는 대원사 다층석탑에 대한 풍화양상, 풍화의 진행에 따른 주성분 원소의 지구화학적 특성과 거동을 검토하였다. 이 결과는 대원사 다층석탑을 이루고 있는 암석의 기계적, 화학적, 광물학적 및 생물학적 풍화와 훼손과정을 밝혀줄 것이며, 석조문화재의 지질학적 안전진단과 보존연구를 위한 자료로 활용될 것이다.

2. 야외조사 및 실내실험

이 연구에서는 대원사 다층석탑의 지질학적 풍화특성에 관한 정밀조사가 실시되었으며, 이 탑에서 탈락된 암편 중에서 암석학적 및 광물학적 분석을 실시하였다. 또한 탑의 구조적 불안정, 균열상태와 박피 및 박리 장소에 관한 정밀조사가 수행되었다. 채취시료는 육안관찰에 따른 암상과 풍화등급으로 비교적 풍화가 되지 않은 유형과 풍화가 심하게 진행된 것으로 구분하였다. 이 암석의 화학분석은 유도결합 아르곤 플라즈마 질량분석기(ICP-OES)를 이용하여 정량분석 하였다. 이 연구의 화학분석 결과는 분석과정에서 필수적인 신뢰도 측정을 이용하여 평가되었다. 중복시료와 참고시료를 이용하여 평가한 정확도와 정밀도의 오차는 5% 미만이었다.

이 다층석탑을 이루는 암석에 대하여 반정량적인 광물조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하기 위하여 편광현미경과 전자현미경(SEM)을 사용하였다. 전자현미경의 모델은 LINK 사의 에너지 분산형 X선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimadzu 사의 ISI-SX-40 이다. 분석시료는 탄소와 금으로 이중 피복한 것을 이용하였다. 또한 일부 시료에서 X선 회절분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIIB 였고, X선은 $\text{CuK}\alpha$ 에 조건은 30 kV와 15 mA 였다. 조암광물의 상대적 함량비는 각각의 암석에 관한 박편을 대상으로 전통적인 방법에 따라 모드(mode) 분석을 실시하여 계산하였다. 모드조성은 자동계수기가 장착된 Leitz사 모델의 Orthoplan(071948) 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다.

3. 보존과 관리

대원사 다층석탑은 신라 선덕여왕 15년(서기 646년)에 자장율사가 사리를 봉안하기 위해서 건립한 것으로 알려져 있으나, 임진왜란 때 파괴되자 조선 정조 8년(1784년)에 다시 세워 놓은 것으로서, 드물게 남아있는 조선 전기의 석탑이다(문화재청, 2001). 기단의 위층은 이 탑에서 가장 주목되는 부분으로 상층 기단의 각 면에는 두손을 합장한 공양좌상(사천왕상)이 새겨져 있고 모서리는 우주 대신 인물상이 배치되어 있는 특이한 형태이다.

탑신의 각 지붕들은 처마가 두껍고 네 귀퉁이에서 들려있으며, 옥개석은 하면에 2단씩 받침이 있고 위에는 각형 1단 괴임으로 상부의 탑신석을 받게 하였다

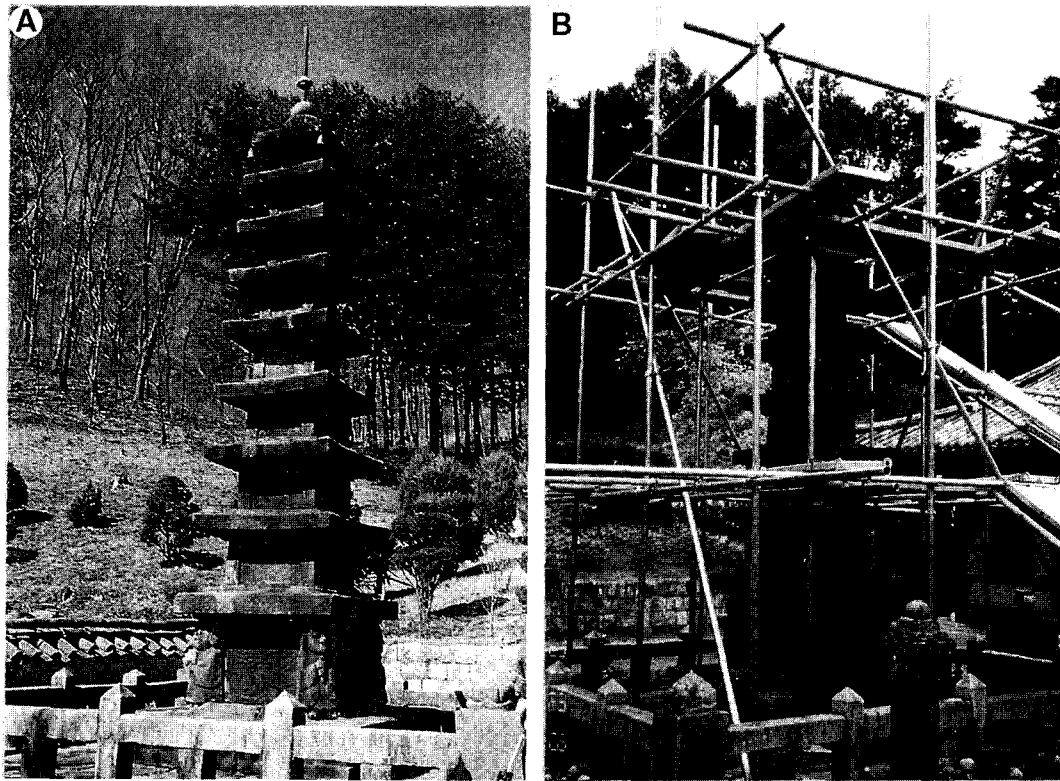


Fig. 1. Field occurrence of the multi-storied Daewonsa stone pagoda (A). Photograph shows a scaffold by steel pipes for the detailed deterioration survey (B). The constituting rocks are tarnished with brown to red color due to the highly surface oxidation.

(Fig. 1). 8층의 옥개석에는 사방에 풍탁이 달려 있으며, 상륜부에는 복발과 칠주가 있고 전체 높이는 6.6 m 이다(문화재청, 2001). 전체적인 체감비율이 뛰어나고 조각은 소박한 편이다. 그러나 건축당시 몇 층을 이루고 있었는지에 대한 확실한 기록이 없어 9층탑 또는 8층탑으로 불리다가 최근에 다층석탑으로 불리게 되었다고 전해진다. 한편 대원사에 보관중인 기록에는 조선 경종 4년에 재건하였고, 1972년에 보수공사와 1988년에 해체 복원공사가 있었으며 이때 58과의 사리와 파손된 사리장엄구가 나와 새로 봉안하였다고 한다(문화재청, 2001). 그러나 정확한 보수 및 복원에 관한 기록은 없다.

사리전을 기준으로 할 때, 이 탑의 정면은 정북방향을 벗어난 N30°E를 향하고 있으며 탑의 4면 모두 정방위를 벗어나 있다. 이는 사찰 경내의 건물배치 및 주변지형의 방향과 어울려 절묘한 조화를 연출하고 있다. 그러나 이 탑은 구성암석의 산화에 의해 전체적으로 적갈색을 띠고 있고, 탑의 부재는 박리와 박락이 심하며, 탑신과 옥개석의 일부는 파손되어 시멘트로 접

착되어 있는 상태이다. 또한 상륜부의 장식은 일부만 남아 있으며, 암석의 종류가 다른 보륜석 및 도기가 칠주에 지지되어 있다.

4. 암석 및 광물학적 특성

4.1. 암석학적 특성

대부분의 석조유물은 이미 상당히 풍화되어 있어 원암의 조직과 조성을 보존하지 않은 경우가 대부분이며, 문화재의 특성상 조금이라도 훼손시킬 수 없어 오로지 육안관찰로 표면을 조사해서 판정해야 하기 때문에 석재의 정확한 감정이란 매우 어려운 일이다. 대원사 다층석탑의 경우는 지리산 산중에 위치하며, 주변에 분포하는 암석과 동일한 암종으로 보아, 다른 장소에서 석재가 공급되기 어려웠으리라 생각된다. 이 연구에서는 옥개석과 탑신에서 박락되어 떨어져 나온 암편을 회수하여 석재의 감정에 이용하였다.

대원사 부근은 지리산 주봉인 천왕봉(1915 m)의 동

북단에 해당되는 곳으로서 전반적으로 험준한 지형을 이룬다. 지리산 주능의 산계는 남북방향을 이루나 대원사가 있는 지역의 수계와 산계는 북서방향을 발달하며

깊은 계곡을 형성하였다. 대원사 부근에는 화강암질 편마암이 넓게 분포하며 회색을 띠는 것과 유백색을 띠는 것이 있다. 또한 이 암석과는 점이적인 관계를 갖는 세

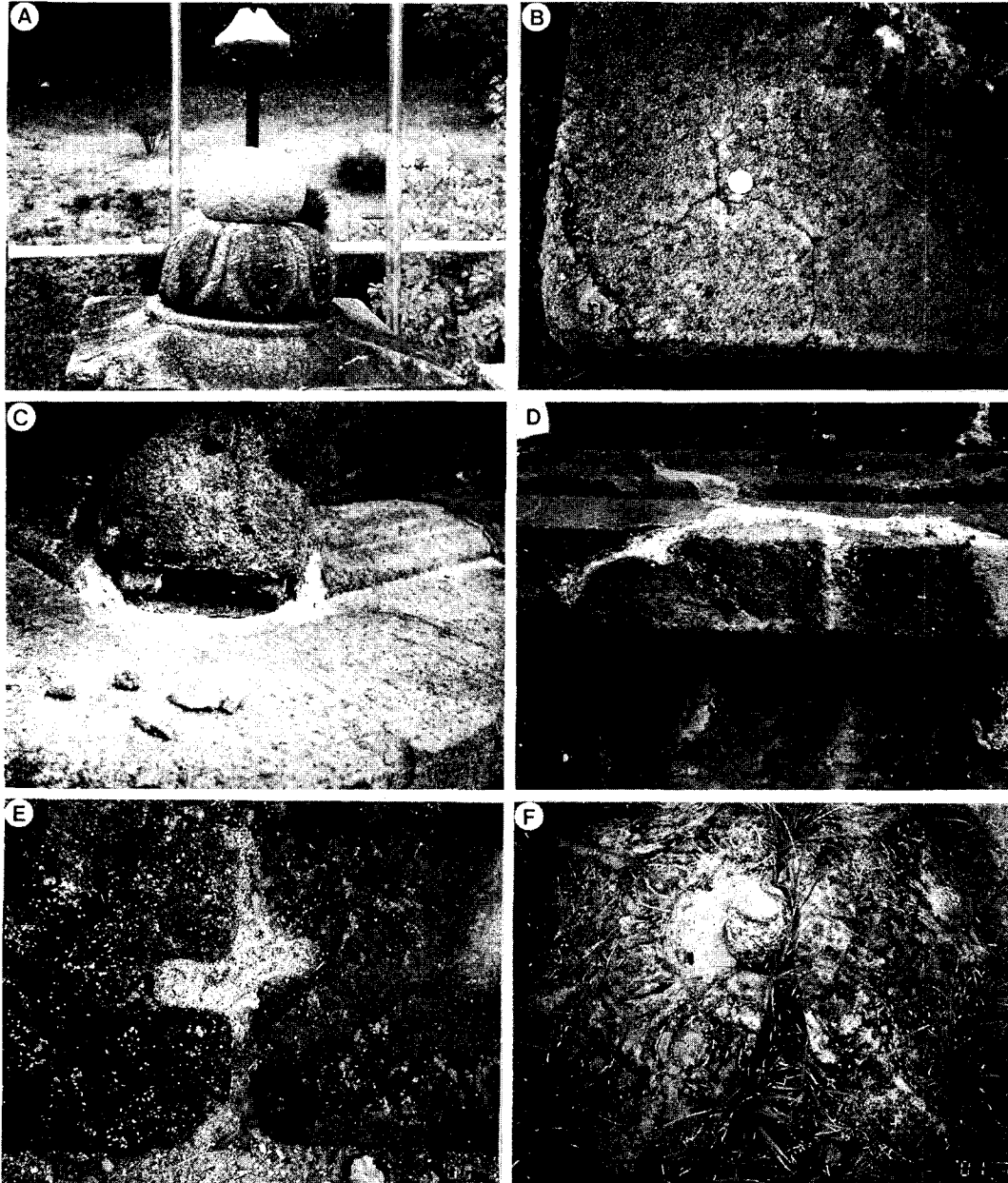


Fig. 2. Constituting rocks and representative deteriorations of the multi-storied Daewonsa stone pagoda. (A) Granitic gneiss, biotite granite and ceramics set up a iron pipe of the upper part which granitic gneiss is yellowish brown color and white grey carbonate minerals filling up the micro-cracks. (B) Radial crack and cement mortar treated garnet-bearing granitic gneiss of the basement rocks. (C) Fine grained granitic gneiss of the basement rock and grey granitic gneiss of the man-shaped pillar stones. (D) Basement and roof stones coated by reddish brown to black precipitates and fractures treated by cement mortar. (E) Dark grey granitic gneiss covered with manganese and iron hydroxides of the ground stone. (F) Basement of stone lamp is leucocratic granite gneiss covered with hydroxides and lichen.

립질 편마암 및 우백질 편마암이 부분적으로 분포한다 (김옥준 등, 1964). 대원사 경내에는 위의 모든 암석이 분포하나 주로 화강암질 편마암이다. 다층석탑의 부재도 화강암질 편마암이 대부분이며 부분적으로 세립질 화강편마암과 우백질 화강편마암이 혼재한다.

세립질 화강편마암은 엽리의 발달이 미약하나 미사장석과 석류석이 반상변정을 이룬다. 주요 구성광물은 석영, 미사장석, 정장석, 사장석, 밀메카이트(myrmekite) 및 흑운모이다. 석영을 제외한 대부분의 무색광물은 심한 견운모화 작용을 받았으며 부분적으로는 조장석화 작용도 있었다. 우백질 화강편마암은 엽리가 잘 발달되어 있어 N5~36°E의 주향에 55~85°SE의 경사를 보인다. 이 암석은 대체적으로 중립의 등립질이나 부분적으로 석류석의 반상변정과 녹니석의 집합체가 관찰된다. 석류석 변정의 크기는 약 2~3 mm 이며 보통 담홍색을 띤다. 이 암석의 주요 구성광물은 석영, 미사장석,

흑운모, 석류석 및 녹니석이다. 부분적으로 페그마타이트(pegmatite)질 암석이 패치(patch)상으로 나타난다.

화강암질 편마암에 발달된 엽리는 N40~50°E의 주향에 75~85°NW로 경사한다. 이 암석에는 특징적으로 석류석과 규선석이 함유되어 있다. 현미경하에서는 석영, 페다이트(perthite), 사장석, 흑운모 및 각섬석이 주류를 이루며 지어콘(zircon), 티탄철석, 황철석과 자철석이 수반된다. 석영은 재결정 되어 있으며 파동소광이 현저하다. 페다이트는 반상변정조직으로 산출되며 사장석은 취합쌍정을 이루나 대부분은 이차광물로 변질되어 있다. 흑운모는 적갈색의 신장된 조직을 보이며 벽개면과 입자경계는 녹니석화 작용을 받았다. 각섬석과 규선석은 흑운모 주변에 생성되어 있다.

4.2. 광물학적 및 화학적 특성

대원사 다층석탑의 부재는 화강암질 편마암이 대부

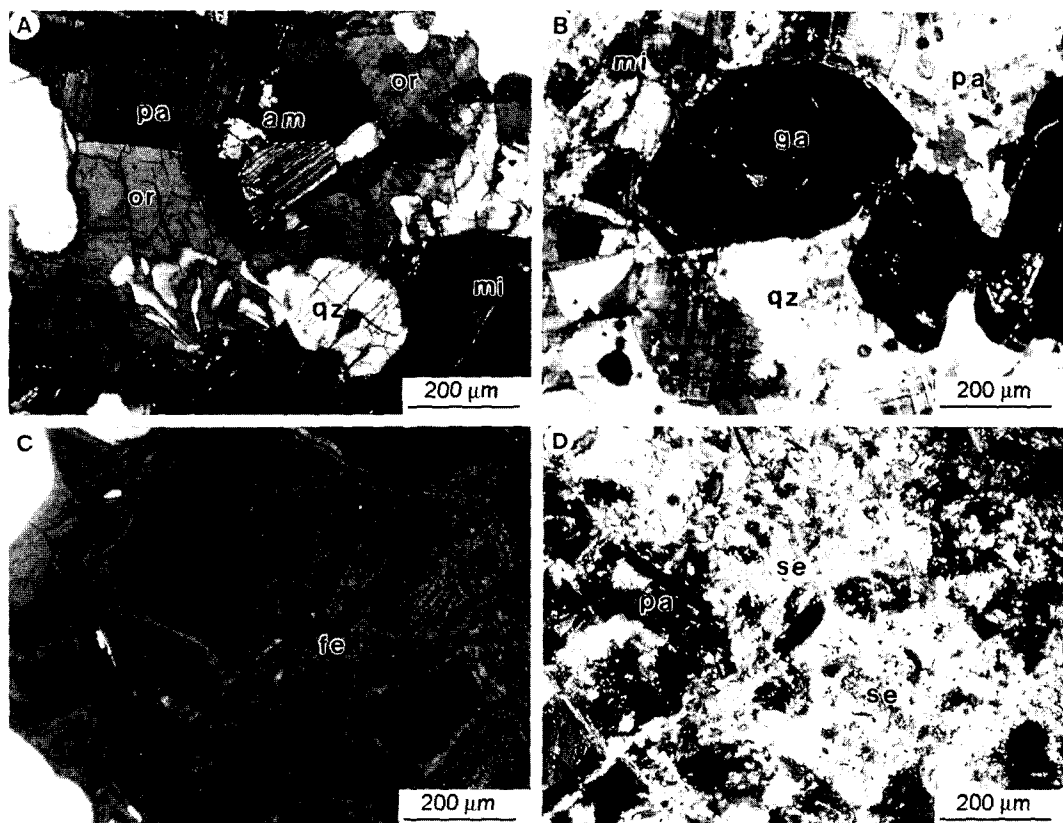


Fig. 3. Microphotographs showing weathered host rock of the multi-storied Daewonsa stone pagoda. (A) Plagioclase (pa), orthoclase (or), microcline (mi), quartz (qz), amphibole (am) and biotite assemblages of the fine grained granitic gneiss. (B) Granitic gneiss composed of quartz, plagioclase, garnet (ga) and microcline which feldspars are highly clay mineralization. (C) Amorphous compounds of iron hydroxides (fe) in the cavity due to the surface oxidation. (D) Highly sericitized feldspars (se) in the granitic gneiss.

분이며 부분적으로 세립질 화강편마암과 우백질 화강편마암이 혼재한다. 상륜부 보륜석의 암석은 흑운모 화강암이며 원추형 보주는 도기로서 최근의 보수공사에서 새로 만들어 넣은 것으로 보인다. 이 탑은 전체적으로는 철수산화 광물의 피복으로 인하여 황갈색 또는 적갈색을 띤다(Fig. 1). 상륜부는 화강암질 편마암으로서 찰주에 의해 지지된 도기와 흑운모 화강암으로 구성되어 있으며(Fig. 2A), 기반부의 암석은 석류석을 함유한 세립질 화강편마암으로서 시멘트 몰탈처리와 방사상 균열이 발생되어 있다(Fig. 2B).

그러나 인물상 우주를 이루고 있는 암석은 비교적 조립의 화강암질 편마암이나, 옥개석은 부분적으로 파손이 심하여 시멘트 몰탈로 처리되어 있는 상태이다(Fig. 2C, 2D). 지대석의 구성암석은 회색의 화강암질 편마암이나 망간과 철 산화물로 피복되어 암흑색으로 변색되어 있다. 여기에는 탑신의 불균형과 뒤틀림을 방지하기 위해 나비장식으로 고정한 흔적이 있다(Fig. 2E). 이 탑의 주변에 분포하는 탑재와 석등 받침대에서는 우백질 화강편마암이 관찰된다(Fig. 2F).

이 암석들을 편광현미경하에서 관찰하면(Fig. 3), 우백질 화강편마암은 석영, 사장석, 석류석 및 미사장석으로 구성되어 있다. 세립질 화강편마암은 사장석, 정장석, 미사장석, 석영, 각섬석 및 흑운모로 구성되어 있으며 밀메카이트 조직이 관찰된다. 이 암석들의 광물 조합을 이루는 장석류도 대부분 점토광물로 변질되어 있다(Fig. 3A, 3B). 탑의 전신에 걸쳐 나타나는 황갈색 또는 적갈색 피복물질은 불규칙하게 성장하면서 침전한 철수산화 광물로서 비정질 산출상태를 갖는다(Fig. 3C). 회색 화강암질 편마암은 세립질 현정조직을 갖는 우흑대와 조립질 우백대로 나누어진다. 우흑대의 구성광물은 석영, 흑운모, 각섬석, 황철석 및 자철석 등이며, 우백대의 주요 조암광물은 석영과 사장석이다.

이 암석은 석영이 25%, 사장석이 50%, 알카리 장석이 15% 정도 함유되어 있고, 유색광물로 흑운모, 석류석 및 각섬석이 5% 미만이다. 이 중에 알카리 장석은 견운모화 되어있으며, 흑운모는 입자의 경계나 벽개면을 따라 녹니석화 작용을 받았다(Fig. 3D). 이 다층석탑의 구성암석에 관한 X-선 회절분석 결과를 보면 스멕타이트(smectite) 군의 점토광물, 흑운모, 정장석, 석영, 사장석 및 방해석으로 구성되어 있음을 보인다(Fig. 4). 방해석은 탑재의 균열과 이격에 충전되어 있던 시멘트 몰탈이 용해되어 생성된 것으로 보인다.

이들을 대표할 수 있는 시료를 선택하여 주성분 원소의 화학조성을 분석하였다. DW-1과 DW-2는 다층석

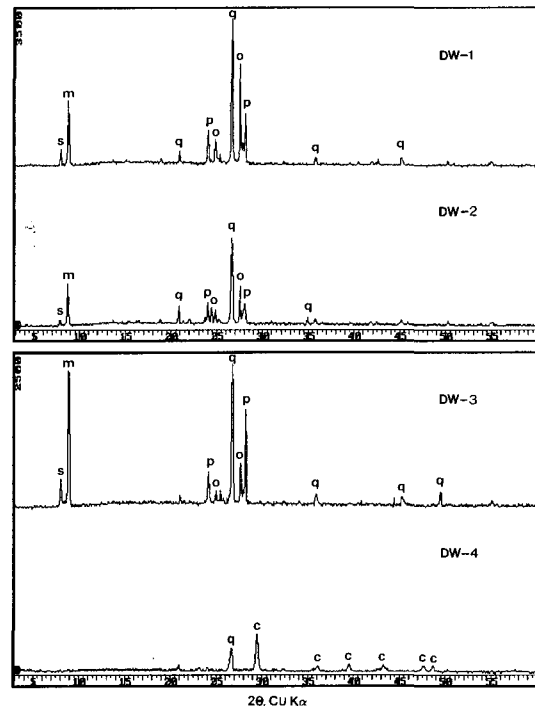


Fig. 4. X-ray powder diffraction pattern showing host rock of the multi-storied Daewonsa stone pagoda. s = smectite group mineral, m = mica group mineral, q = quartz, p = plagioclase, o = orthoclase, c = calcite.

탑의 탑재에 대한 분석치이며, DW-3은 특히 황갈색 침전물이 많은 부분이다. 한편 DW-4는 회백색 침전물이 많이 나타나는 부분이며, DW-5와 6은 대원사 주변에 분포하는 암석 중에 다층석탑과 같은 풍화도를 지시하는 암석에서 우백대와 우흑대를 나눈 것이다. DW-7은 세립질 화강편마암의 분석결과이다. 모든 구성암석의 주성분 원소조성은 비교적 균질하나 SiO_2 와 Al_2O_3 의 함량이 높은 경향이 있다(Table 1).

편마암류(DW-1, 2, 5, 7)의 전암 화학조성을 보면 SiO_2 의 함량은 63.78~66.65 wt.%로서 거의 균질한 조성을 보이며 Al_2O_3 의 함량도 13.74~19.34 wt.%로서 전형적인 산성 편마암의 범주를 나타낸다. 또한 Na_2O 와 K_2O 의 함량은 각각 0.68~1.15 wt.%, 3.16~5.40 wt.%로서 비교적 낮은 함량을 갖는다. 그러나 이 암석의 분석치는 심하게 풍화작용을 받은 암편에 관한 조성으로서 암석의 화학적 진화를 설명하기에는 많은 문제가 있음을 내포하고 있는 것이다.

일반적으로 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO 및 TiO_2 의 함량은 부의 상

Table 1. Major element concentrations (wt. %) in constituting rocks of the multi-storied Daewonsa stone pagoda.

No.	DW-1	DW-2	DW-3	DW-4	DW-5	DW-6	DW-7
SiO ₂	65.82	65.74	54.78	21.07	63.78	44.92	66.65
Al ₂ O ₃	15.81	15.34	15.99	5.81	19.34	24.82	13.74
Fe ₂ O ₃	6.14	8.25	15.88	0.70	6.05	11.70	8.94
MnO	0.05	0.11	0.06	0.07	0.06	0.10	0.07
MgO	2.33	2.38	2.92	0.63	2.14	4.48	0.97
CaO	1.96	1.93	1.93	30.54	0.94	0.87	3.12
Na ₂ O	0.83	1.15	0.94	0.01	0.68	0.03	0.95
K ₂ O	4.68	3.38	3.39	0.83	5.40	4.31	3.16
TiO ₂	0.77	0.62	1.27	0.08	0.46	1.03	1.14
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.07	0.04	0.13	0.12	0.39
LOI	1.35	0.28	2.37	32.87	0.52	6.72	0.31
Total	99.82	99.25	99.60	92.65	99.50	99.10	99.44
Fe ₂ O ₃ ; total Fe							

관도를 보였으며 K₂O의 함량은 정의 관계를 갖는다. 그러나 Na₂O의 함량은 특별한 경향을 보이지 않았다. 이는 암석의 일반적인 화학적 특성과 풍화에 의한 상대적인 소실효과가 반영된 것으로 판단된다(Murphy *et al.*, 1998). 한편 DW-3은 Fe₂O₃와 MnO의 양이, DW-4에서는 CaO의 양이 상당히 높다. 이는 풍화에 의해 생성된 철수산화 광물과 시멘트 불탈의 용해에 따른 방해석 결정의 영향이다. 또한 DW-6에서 Al₂O₃가 부화된 것은 운모 및 각섬석류가 우후대에 농집된 결과로 해석된다.

5. 지질 및 암석학적 안전진단

5.1. 구조적 안정성

모든 석조문화재의 구조적 불안정은 주로 지반의 영향을 받는다. 이에 관하여는 별도로 상세히 다루어질 예정이기 때문에 여기에서는 지반의 불안정에서 야기된 암석학적 문제점만을 간단히 기술하기로 한다. 대원사 다층석탑의 암석학적 훼손에 가장 큰 문제가 있는 것은 전반적으로 채색변질과 기반부의 균열 및 탈락이다. 이는 탑의 구조적 문제와도 관련이 있다. 이 탑은 전반적으로 사리전쪽으로 약간 기울어져 있으며 이는 지반의 불안정과 관련이 있고 2층 기반석의 균열 및 1층 탑신의 경사에서도 확인 할 수 있다.

또한 상대적으로 동남쪽 부분이 심한 풍화가 발생하여 암석이 갈라져 있으며 손만 대로 부스러질 정도로 이미 토양화가 진행되어 있다. 이는 현재 상태로는 어떠한 보존처리도 효과를 발휘하기 곤란한 상태이기 때

문에 기반부의 일부는 암석학적으로 동일한 부재를 선택하여 교체해야 할 처지에 있다. 이 부분이 상대적으로 심하게 훼손된 것은 기상변화에 제일 민감한 동남쪽에 노출되어 있기 때문이다. 이것도 역시 탑의 구조상 피하기 어려운 상태이다.

5.2. 물리적 및 기계적 풍화와 진단

암석의 기계적인 풍화작용이란 큰 화학적 변화 없이 입자와 입자의 경계부, 공극과 같이 암석과 광물의 불연속면을 따라 입자들이 깨지는 물리적인 분해현상을 말한다. 이 기계적 풍화작용은 대기에 노출된 곳이면 어디든지 발생할 수 있으며 특히 암석으로 피복된 지면과 노출된 절벽에서 뚜렷하다. 이들이 암석의 물성변화를 초래하게 되며 한번 생성된 열극은 반복되는 기계적 풍화작용에 따라 박리와 박락이 발생되고 절리 또는 단층으로 발전하여 건축물의 구조적 안정성에 심각한 타격을 주게 되는 것이다.

대원사 다층석탑에 나타난 부재의 파손과 균열 및 대표적인 손상현황을 보면 Fig. 2와 같이, 황갈색으로 변색된 상륜부의 구성암석과 이 암석 사이에 생성된 미세균열 및 이를 충전한 회백색 탄산염광물들을 볼 수 있다(Fig. 2A). 기반부를 이루는 석류석 화강편마암에는 1~3 mm 정도의 넓이를 갖는 방사상 균열과 이미 탈락된 암석이 나타나 있으며 이 부분을 콘크리트로 보강하기도 하였다(Fig. 2B, 2D). 또한 1층과 2층 옥개석의 균열대와 표면에서도 박락이 발생하였다. 탑신과 옥개석 사이에 충전된 시멘트 몰탈도 적갈색 침전물로 피복되어 있으며, 탑신과 탈락된 기반부의 옥개석 편을 시멘트 몰탈로 접합처리한 부분은 그대로 드러나 있다. 특히 상대갑석과 1층 옥개석에는 N82°E와 N14°W의 방향, 85°SE와 84°SW의 경사를 갖는 절리가 발달되어있다.

이 다층석탑의 변색 및 박리와 박락에 의한 손상을 보면, 크게 적갈색 철산화물로 피복된 중앙부의 탑신과 옥개석을 들 수 있다(Fig. 5A). 또한 암갈색 망간산화물과 적갈색 철산화물 및 회백색 탄산염 침전물로 피복된 중앙부 옥개석과 탑신도 볼 수 있다(Fig. 5B). 이 적갈색 피복물질이 두꺼운 피각을 형성한 곳에서는 5 mm 정도의 두께를 보이기도 한다. 일부 옥개석은 철산화 광물이 원형 박락에 의해 탈락하고 있으며 (Fig. 5C), 두터운 층을 이루고 있는 비정질의 철산화물과 강수와의 반응으로 생성된 유백색 탄산염 광물(방해석)이 피각을 형성하기도 하였다(Fig. 5D, 5E). 산화작

용이 심한 곳에서는 불규칙한 두상을 이루며 성장한 망간 및 철산화물과 강수의 유동흔적을 따라 생성된 탄산염 광물의 백화현상이 어울려 흉하게 노출되어 있

다(Fig. 5F).

이 다층석탑에서 제일 중요한 부분은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 각 면에 조각된 합장공양상과 원각한 인

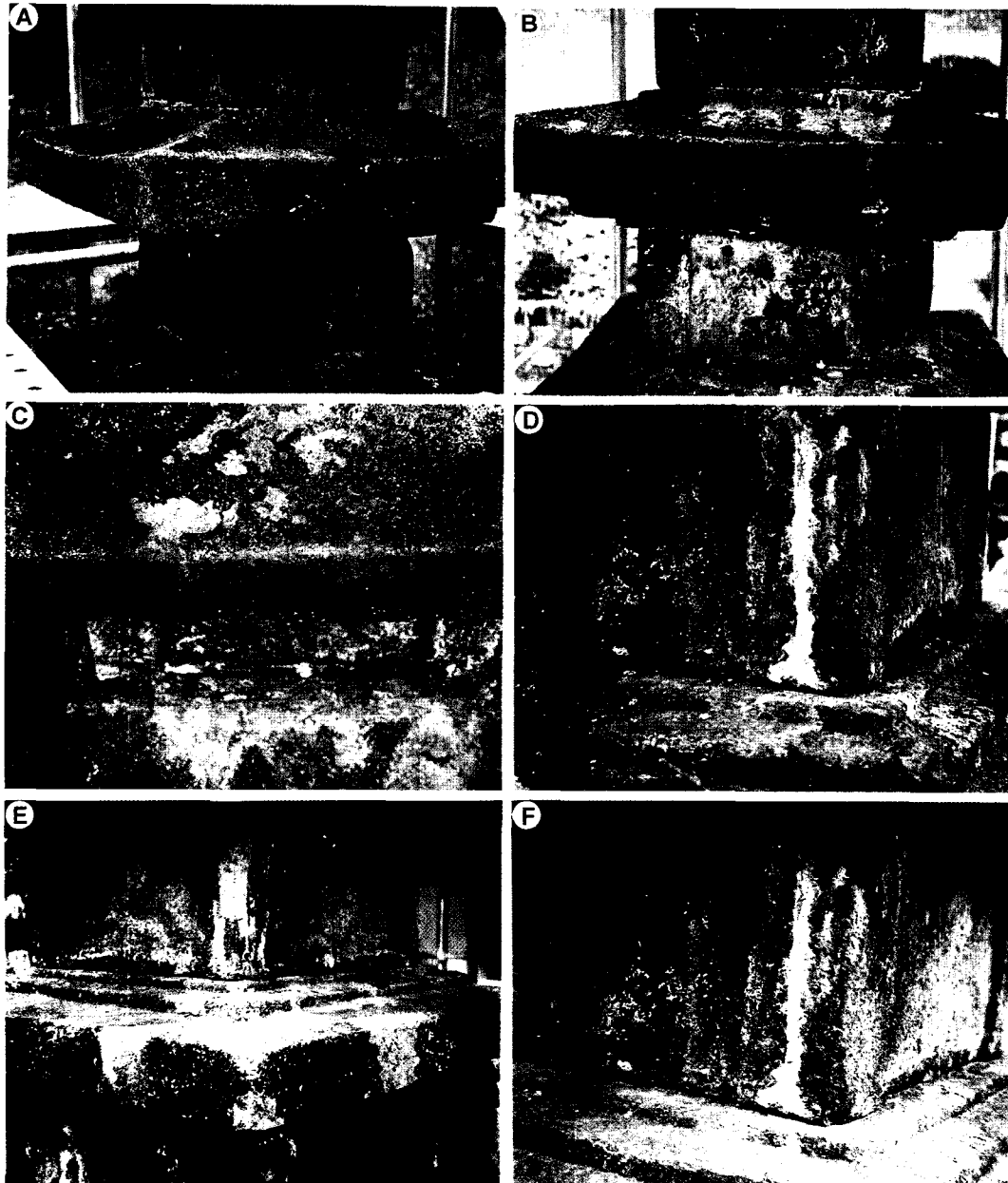


Fig. 5. Color change and exfoliation showing constituting rocks of the multi-storied Daewonsa stone pagoda. (A) Central main body and roof stone coated with reddish brown iron hydroxides and precipitates. (B) Consisting rock of central main body and roof changed the color into dark brown manganese hydroxides, reddish brown iron precipitates and white grey carbonate minerals. (C) Circle-shaped exfoliation of reddish brown precipitates in the roof stone. (D) Reddish brown tough crust of amorphous iron hydroxides and white grey precipitates of carbonate. (E) White grey carbonate minerals dissolved by cement mortar and reddish brown to dark grey precipitates of the manganese and iron hydroxide. (F) Globular shaped manganese, iron hydroxides and white amorphous carbonates along the rain pass way.



Fig. 6. Seated four Buddha sculptured four face of the upper basement stone and the man-shaped pillar stones in the four corner of the multi-storied Daewonsa stone pagoda. There are tarnished and/or covered with dark brown manganese, reddish brown iron and white grey carbonate hydroxides precipitates which are highly corrosion and exfoliation along the edge surface. The eyes and eyebrows of the man-shaped pillar stones are colored with black ink and the low plants live to open cavities in the basement stones.

물입상형의 우주석이다. 상층기단의 각 면 모서리에 있는 우주석의 원암은 회색의 화강암질 편마암이나 표면 박락과 부식이 심각하며 망간, 철 및 탄산칼슘의 침전 피복물질이 산재한다. 또한 눈썹과 눈은 먹물로 덧칠해져 있고 하단부의 공간에는 지의류와 선대류가 서식할 정도로 심한 손상을 보여준다. 상층기단의 각 면에 조각된 합장공양좌상의 산출상태와 손상현황을 보면, 원암의 조성을 확인할 수 없을 정도로 표면 박락과 부식이 심각하며 암흑색, 황갈색 또는 적갈색 및 회백색의 침전피복물질로 덮여있는 것을 볼 수 있다.

5.3. 화학분석 및 전자현미경적 분석과 진단

석조문화재의 풍화과정에는 주로 용해, 수화, 가수분해, 산화환원, 탄산화 및 킬레이트화 작용 등이 있으나 대부분은 서로 복합적으로 작용하여 암석을 파괴한다. 특히 쌍정과 벽개가 잘 발달된 장석과 운모류의 변질에서부터 시작된다(Nagano and Nakashima, 1989;

Sharma and Rajamani, 2000). 일반적으로 암석의 풍화환경에서 원소의 상대적인 거동을 표현하기 위해 흔히 Al_2O_3 , TiO_2 및 Fe_2O_3 중에 하나를 고정성분으로 사용한다. 그러나 이 탑 주변의 풍화단면에는 다량의 점토광물이나 산화철 광물들이 생성되어 있으므로 이들을 고정성분으로 풍화에 의한 원소의 거동을 설명하기는 어려운 것으로 판단된다.

Table 1에 제시된 주성분 원소에 대하여 부화와 결핍정도를 비교하고자 가장 최근에 보고된 편마암류의 평균 조성(이석훈과 김수진, 2001)을 기준으로 표준화하였다(Table 2). 이 부화지수(enrichment index)는 1을 기준으로 높은 값은 부화를, 낮은 값은 결핍을 의미한다. 이 시료들은 동일 종류의 편마암에 비하여 SiO_2 , Na_2O , P_2O_5 를 제외한 대부분의 원소가 부화되어 있다. 특히 Fe_2O_3 는 1.31~2.49배 부화되어 있으며 철산화물의 피각층에서는 3.38배의 철이 농집되어 있는 것으로 보아 철이 적화현상의 주요 물질로 판명

Table 2. Enrichment indices of major elements in constituting rocks of the multi-storied Daewonsa stone pagoda.

No.	DW-1	DW-2	DW-3	DW-4	DW-5	DW-6	DW-7
SiO ₂	0.96	0.96	0.80	0.31	0.93	0.65	0.97
Al ₂ O ₃	1.08	1.05	1.09	0.40	1.32	1.70	0.94
Fe ₂ O ₃	1.31	1.76	3.38	0.15	1.29	2.49	1.90
MnO	1.68	3.67	2.00	2.33	2.00	3.33	2.33
MgO	1.45	1.48	1.81	0.39	1.33	2.78	0.60
CaO	1.00	0.99	0.99	15.58	0.48	0.44	1.59
Na ₂ O	0.32	0.46	0.36	0.01	0.26	0.12	0.37
K ₂ O	1.39	0.99	0.99	0.24	1.58	1.26	0.92
TiO ₂	1.60	1.29	2.65	0.17	0.96	2.14	2.38
P ₂ O ₅	0.53	0.48	0.47	0.27	0.87	0.80	2.60
LOI	1.09	0.23	1.99	26.51	0.42	5.42	0.25
mean	1.12	1.21	1.50	4.21	1.04	1.92	1.35
CIA*	62.26	62.81	64.63	8.90	70.08	79.80	56.29

Fe₂O₃; total Fe, CIA*; chemical index of alteration by Nesbitt and Young (1982)

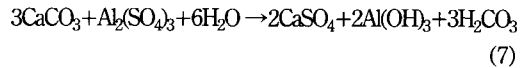
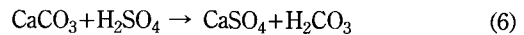
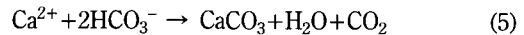
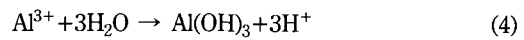
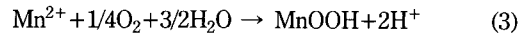
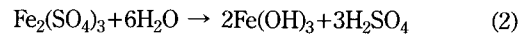
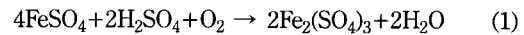
되었다. 암갈색 피각을 형성한 MnO도 1.68~3.67배나 농집되어 있음을 보인다. 한편 시멘트 몰탈이 용해된 부분에서는 CaO의 함량이 15배 이상 부화되어 있었다.

한편 암석의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(CIA; chemical index of alteration)를 다음과 같이 계산할 수 있다(Nesbitt and Young, 1982). 이 CIA mole ratio of (Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O))×100를 기준으로 대원사 다층석탑을 이루는 암석의 화학적 풍화지수를 산출하면 Table 2와 같이, 편마암류들은 56.29~79.80의 범위로서 아주 높은 화학적 풍화도를 보인다. 특히 편마암류들의 우흑대가 쉽게 변질되었음을 나타내었다. 이 원소들은 암석의 풍화작용에 의하여 부화된 것으로서 사장석, 정장석 및 흑운모가 풍화에 따라 점토광물과 산화철 광물로 변질되었기 때문으로 해석된다.

이 다층석탑을 이루는 암석의 장석류는 대부분 견운모와 고령석으로 변질되어 있으며 흑운모도 입자경계나 벽개면을 따라 녹니석, 녹염석 및 철 수산화 광물로 교대되었다. 이를 전자현미경에서 보면 철과 망간 산화물들은 미립의 구형 집합체를 이루어 조암광물의 표면을 피복하고 있다(Fig. 7A). 장석들은 용식에 의하여 많은 공극이 발달된 것을 볼 수 있고, 특히 시멘트 몰탈이 용해되어 회백색 침전물을 형성한 곳에서는 석고와 방해석의 결정을 관찰할 수 있다(Fig. 7B, 7D).

또한 공극과 입간에는 이차적으로 생성된 불석군의 점토광물을 관찰된다(Fig. 7C). 대부분의 석영과 장석의 입자경계에서 장석의 풍화에 따라 생성된 점토광물이 결정면을 피복하고 있다.

이 광물들의 대부분은 현미경하에서 관찰되는 미세 열극을 따라 생성되어 부피를 팽창시키고, 규산과 물을 흡수하거나 용출시켜 광물의 이차반응을 촉진시키는 용매역할을 한다(Banfield and Eggleton, 1990). 따라서 이는 육안으로는 드러나지 않는 광물학적 및 화학적 풍화작용이 끊임없이 진행되고 있다는 것을 지시하는 것이다. 또한 흑운모와 각섬석도 화학적 풍화에 의하여 녹니석, 녹염석과 불투명 철광물로 변질된 것을 알 수 있다. 이와 같은 풍화반응 중에 대원사 다층석탑에서 이차적인 변색을 야기할 수 있는 물질과 착색 화합물은 아래의 반응과 같은 것들이 있다.



반응식 (1)과 (2)는 주로 조암광물 중에 포함된 철분과 철광물이 산화과정을 거쳐 황갈색 또는 적갈색으로 변색되는 과정이며, (3)은 암석에 포함된 망간이 산화망간을 형성하면서 암흑색으로 변화는 반응식이다. 또한 반응식 (4)는 회백색 침전물로 나타나는 알루미늄의 대표적인 산화과정이다. 반응식 (5), (6), (7)은 대기 중에서 Ca의 분해와 용해 및 침전이 발생할 수 있는 대표적인 반응과정이다. 이는 대원사 다층석탑을 구성하는 조암광물의 Ca이 반응에 참여한 경우도 있을 수 있으나, 실제 대부분의 회백색 침전물은 보수유지에 사용되었던 콘크리트와 시멘트 몰탈이 용해되어 방해석과 석고로 침전하는 과정에서 생성된 것으로 판단된다.

5.4. 생물학적 풍화특성과 진단

이 다층석탑은 또한 생물학적 오염이 가중되어 있으며 균류, 조류, 지의류나 선대류들은 암석의 표면에 고

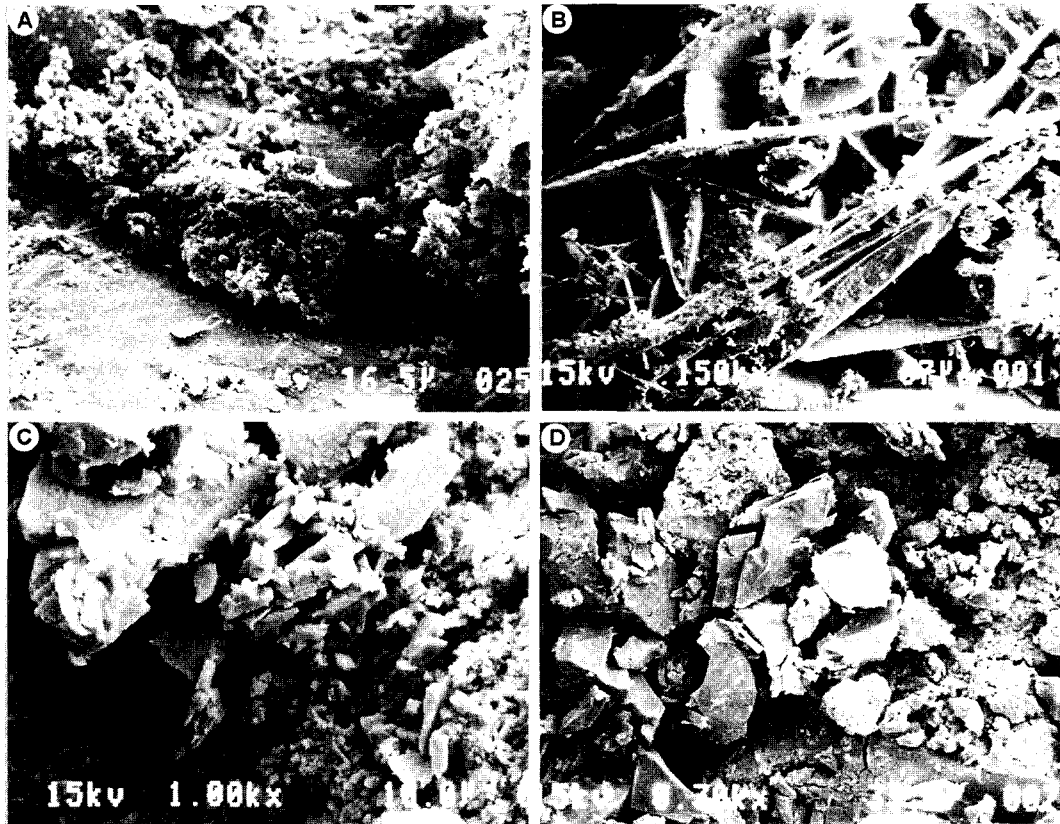


Fig. 7. Scanning electron microphotographs (SEM) of secondary minerals in the multi-storied Daewonsa stone pagoda. (A) Tiny aggregate compounds of amorphous iron hydroxide minerals in the stone surface. (B) Bladed gypsum in the white grey precipitates. (C) Some clay minerals between the quartz and feldspar. (D) Subhedral carbonate minerals in the white grey precipitates.

착되어 기생하면서 암흑색, 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출된다(Fig. 8A, 8B). 이들이 성장을 멈추면 암흑색 또는 흑갈색으로 변색되어 미관을 해치는 것은 물론 암석의 풍화도 촉진시키는 것이다(Billings, 1950). 지의류에 따른 피도를 보면 40~55%로 부착생물의 번식이 아주 심각한 수준이며, 주변에 분포하는 탑재는 80% 이상의 피도를 보인다. 또한 직사광선을 받기 어려운 일부를 제외하고는 전체적으로 담록색, 암흑색 또는 흑갈색을 띠는 지의류가 피복되어 있으며, 약 2 cm 깊이 까지 포자근과 균사의 영향을 받은 것으로 나타났다.

Fig. 8C, 8D는 옥개석을 이루는 탑재에서 관찰되는 유기물의 전자현미경 사진이다. 암석의 표면으로부터 1 cm 깊이의 시료에도 조암광물의 공극에서는 2~3 μm 정도의 두께를 갖는 지의류의 포자근과 균사가 서로 엉켜있다. 암석내부에서도 조암광물의 공극과 입자

경계는 섬유 또는 다발상태로 산출된다. 또한 석영과 장석의 입간공극을 침투한 지의류의 포자근과 균사, 이차적으로 생성된 점토광물과 결합되어 조암광물의 입간을 충전하는 등, 아주 다양한 형태의 생물학적 풍화 현상을 관찰할 수 있다. 이런 곳은 암석의 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화도 심하게 진행되어 있어 약한 충격에도 쉽게 떨어져 나온다.

토양화의 깊이를 나타내는 심도는 지의류 및 선태류의 번식에 의해 암석의 표면이 얼마나 침식을 당하였는지 여부를 보여주는 지표가 된다. 이 탑의 토양화 심도는 옥개석의 경우 5 mm가 넘는 것으로 보아 이 생물들이 제거될 때 암석의 인위적인 풍화도 감소해야 할 것이다. 한편 기반부와 옥개석에는 이미 잡초 및 고등식물의 천이가 발생한 상태이다. 이와 같은 식물체에 의한 기계적 풍화도 가속되고 있어, 이에 대한 대비가 있어야 하겠다.

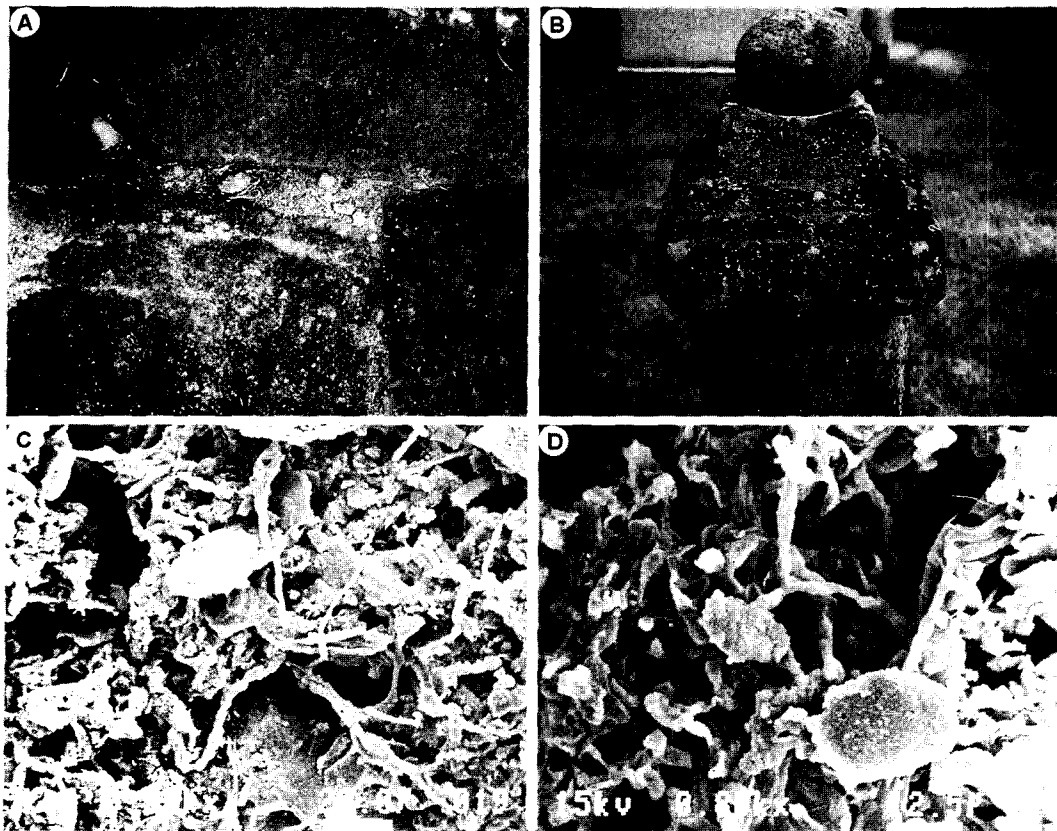


Fig. 8. Photographs showing biological weathering of the multi-storied Daewonsa stone pagoda. (A) Some weeds occur boundary between the ground stones, which are covered dark black manganese hydroxides. (B) Green lichen and algae showed the stone surface. (C, D) Scanning electron microphotograph (SEM) show Crustose lichen's rhizoid (?) of green lichen and algae which are aggregate with clay minerals.

6. 보존과학적 제언

대원사 다층석탑 주변에는 예불단으로 쓰이는 암석과 같이 탑신과 옥개석의 모양을 갖추고 있는 탑재가 산재한다. 다층석탑의 앞뒤에 놓여져 있으며 용도가 불분명한 탑재와, 상륜부의 구성암석으로 적합할 것으로 보이는 탑재가 있는 것으로 보아, 대원사 경내에는 또 다른 형태의 탑이 있었음을 강력히 시사한다. 한편 대원사 주변의 경내 및 계곡에 분포하는 암석을 보면, 다층석탑과 마찬가지로 심한 적화현상을 볼 수 있다. 이는 대원사 부근에 분포하는 암석이 일반적인 편마암류의 철 함량에 비하여 비정상적으로 높고 이들이 자연수와의 반응을 통하여 장구한 세월동안 산화물을 분비하면서 표면을 피복한 것으로 판단된다. 이와 같이 다층석탑의 적화와 백화 현상은 암석의 풍화과정에서 발생하는 자연적인 현상으로 인위적인 통제가 어려운

상황이다. 따라서 보호각을 지어 관리하기 이전에는 탑에 영향을 미치는 모든 수분의 유지시간을 최대한 단축시키는 것이 필요하다.

이 탑은 전반적으로 북동쪽으로 약간 기울어져 있으며 이는 지반의 불안정과 관련이 있고 2층 옥개석의 풍화와 중앙부 기둥의 경사에서도 확인 할 수 있다. 따라서 강수는 침입이 집중되어 오랜 기간동안 배수되지 않고 남아있다가, 석재에 포화되고 과포화된 수분이 천천히 스며 나오면서 암석을 파괴하는 것이다. 여기에 대한 근본적인 대책은 항상 청결한 상태의 배수로와 방수처리 및 지반의 불균형을 바로 잡는 것이다. 또한 각각의 옥개석과 탑신 및 기단부의 구성암석은 동남쪽의 것이 상대적으로 심한 균열이 발생하여 암석이 갈라지고 있으며 토양화가 진행된 곳도 있다.

이는 현재 상태로는 어떠한 보존처리도 효과를 발휘하기 곤란한 상태이기 때문에 암석학적으로 동일한 부

재를 선택하여 교체 해야할 처지에 있다. 이 부분이 상대적으로 심하게 훼손된 것은 기상변화에 제일 민감한 동남쪽에 노출되어 있기 때문이다. 따라서 예술적 가치를 훼손하지 않는 범위에서 지반의 구조적 안정을 위한 지질공학적 보강과, 열극의 보수가 시급한 실정이다. 이 탑의 풍화현상은 여러 원인이 복합적으로 작용한 결과이며 가장 중요한 문제는 황갈색의 표면산화, 지반의 불안정에서 발생하는 불균형과 이에 수반되는 암석의 균열이다. 이차적인 것으로 탑의 편하중에 의해 발달한 작은 틈을 따라 풍화가 깊이 진행되는 현상, 벌어진 틈을 메운 시멘트나 다른 몰탈에 의한 부식, 틈에 삽입된 철판의 산화작용으로 적화가 촉진된 것 등을 들 수 있다.

따라서 상륜부 부재는 일부가 소실되었고, 본체의 암석과는 전혀 다른 흑운모 화강암 및 도기편으로 대체하였다. 이는 동일한 부재를 선택하여 수리해야 할 것이다. 한편 지대석의 모서리가 유실되어 옥개석과의 연결부위에 충전된 시멘트 몰탈과 각 부분의 들떠있는 위치에 삽입된 철판과 시멘트 몰탈은 제거한 후에 에폭시 계열의 수지와 경화제를 이용하여 접합해야 한다. 향후 보존처리 연구는 이런 모서리 마모와 미세균열 크기의 지속적인 측정과 균열이 심한 절리면에는 암석용 충전제를 사용한 경화처리가 선행되어야 할 것으로 보이며, 탑신의 하중에 의한 균열처리를 고려해야 할 것이다. 또한 표면에 피복된 지의류를 제거하기 위한 생화학적 처리가 요구된다.

석조문화재의 열극에 대한 보존처리에는 외관을 훼손하지 않도록 충전제와 발수경화제 등의 보수용 접착제로 시공하는 것이 일반적이다(김사덕 등, 1999; 엄두성 등, 1999). 암석의 공극을 충전하는 보존처리 과정에서는 합성수지만으로는 점도가 낮아 접착이 불가능하기 때문에 경화제와 속결제를 혼합하여 점도를 조절하며 사용한다. 그러나 수리부분의 표면이 자외선, 습도 등의 주변환경에 의하여 황색으로 변하고 균열이 발생하는 등 문제점이 발생할 수 있으므로 시약의 선택이나 작업에 주의를 요한다. 그러나 보다 근본적인 방법으로는 석탑에 직접적인 영향을 미치는 지면습도를 최소화하고, 강수와 우수의 침입을 저감할 수 있는 차수막이 설치되어야 할 것이다.

과거 석조물의 접합을 보강하는 목적으로 사용된 재질은 무쇠가 주로 사용되었으나 이들이 부식되면서 생성된 철산화물들이 석재표면을 오염시키기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 티타늄 또는 텅스텐강철 합금을 이용하는 것이 좋다. 이들은 강도와 내식

성이 뛰어난 경금속으로서 인장강도와 밀도가 높으며 고온에서도 거의 변화되지 않고 내응력 및 충격에 대한 반응이 뛰어나 석조문화재 보수에 응용 가능성이 높다. 보강부분에는 접착제와 충전제를 혼합하여 고정시키면 될 것이다(조연태 등, 2001). 표면처리가 완료된 후, 결실 부분에 대한 복원이 불가피할 것으로 보인다. 복원부는 가역성에 중점을 두고 복원부분의 접착력 저하 등 일부 조건들은 무리가 없는 범위에서 처리해야 한다. 색 맞춤은 아크릴 안료로 본래의 색상과 유사하게 채색하여 전반적인 조화가 최적으로 가깝도록 해야 할 것이다.

7. 결 론

1. 대원사 다층석탑(보물 제1112호)의 정면은 N30°E를 향하고 있고, 탑의 4면은 모두 정방위를 벗어나 있다. 이 탑은 구성암석의 표면산화에 의해 전체적으로 적갈색을 띠고 있으며, 탑의 부재는 박리와 박락이 심하고 탑신과 옥개석의 일부는 파손되어 시멘트로 접착되어 있다. 상륜부의 장식은 일부만 남아 있으며 암석의 종류가 다른 보륜석 및 원추형 보주가 찰주에 지지되어 있다.

2. 이 다층석탑의 부재는 회색의 화강암질 편마암이 대부분이며 세립질 화강편마암과 우백질 화강편마암이 혼재한다. 보륜석은 흑운모 화강암이며 보주는 도기로서 최근의 새로 만들어 넣은 것이다. 적갈색 피복물질 이외에도 암흑색의 망간산화물과 시멘트 몰탈에서 용해된 회백색의 석고와 방해석이 산재한다.

3. 이 다층석탑은 사리전쪽으로 약간 기울어져 있으며, 상대적으로 기상변화에 민감한 동남쪽 부분이 심한 풍화가 발생하였다. 상대갑석과 1층 옥개석에는 N82°E와 N14°W의 방향, 85°SE와 84°SW의 경사를 갖는 절리가 발달되어 있으며, 표면에는 균류, 조류, 지의류나 선태류가 기생하면서 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출된다.

4. 기단부의 합장공양상과 우주석은 원암의 조성을 확인할 수 없을 정도로 박락과 부식이 심각한 상태이고 암흑색, 황갈색 또는 적갈색 및 회백색의 피복물질로 덮여 있으며 눈썹과 눈은 먹물로 덧칠해져 있다. 또한 석영과 장석의 입간공극을 침투한 지의류의 포자근과 균사는 이차적으로 생성된 점도광물과 결합되어 다양한 형태의 풍화현상을 보여준다.

5. 이 다층석탑 주변에는 탑재의 모양을 갖추고 있는 것이 많아 또 다른 형태의 탑이 있었음을 강력히 시사

한다. 또한 대원사 경내 및 계곡에 분포하는 암석에서도 이 탑과 동일한 적화현상을 볼 수 있다. 이는 대원사 부근에 분포하는 암석이 일반적인 편마암류에 비하여 철과 망간의 함량이 높고, 이들이 자연수와의 반응에 따라 산화물을 분비하여 표면을 피복한 자연적인 현상이다.

6. 이 탑은 이차오염을 제어하기 위한 보존과학적 처리와 탑재와 지반의 구조적 안정을 위한 보강 및 열극계의 보수가 필요하다. 훼손된 부위는 세척 및 본체의 암석과 동일한 부재를 선택하여 교체하는 것이 바람직하다. 균열이 심한 절리면에는 암석용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 할 것으로 보이며, 하부는 하중을 고려한 보존설계가 필요하다.

7. 손상된 석재는 발수경화용 합성수지를 사용하여 석재내부에 침투시켜 약화된 석재조직의 응집력을 회복시켜주고, 석질을 경화하여 물의 침투로 발생될 수 있는 풍화나 손상을 방지하여야 한다. 그러나 근본적인 방법으로는 석탑에 직접적인 영향을 미치는 지면습도를 최소화하고, 강수와 유수의 침입을 저감할 수 있는 차수막이 설치되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 지원된 공주대학교 문화재비파괴진단연구실의 지원을 받았음을 명기하며 이에 감사한다.

참고문헌

- 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 예복시수지 개발 시험연구. 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20권, p. 139-155.
- 김영화, 홍순호 (1990) 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구. 평산지질, 23권, p. 221-232.
- 김옥준, 홍만섭, 박희인, 박양대, 김기태, 윤선 (1964) 한국 지질도 산정도록 (1:50,000) 및 설명서. 경상남도, 25p.
- 문화재청 (2001) 문화재 상세정보. <http://www.ocp.go.kr/>.
- 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 발수경화제 시험연구(I). 국립문화재연구소, 보존과학연구, v. 20, p. 155-173.
- 이상현 (1998) 국내 석조문화재의 보전대책 수립을 위한 지질학적 고찰. 보존과학회지, 7권, p. 9-18.
- 이상현 (1999) 석굴암을 이루는 암석의 풍화현상. 보존과학회지, 8권, p. 1-9.
- 이석훈, 김수진 (2001) 유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 따른 원소의 거동. 한국광물학회지, 14권, p. 39-51.
- 이찬희, 최석원, 서만철, 채상정 (2000) 구미 황상동 마애여래입상의 구조적 안정성, 풍화 및 보존방안. 보존과학회지, 9권, p. 21-32.
- 이찬희, 최석원, 한경순, 원경식 (2001) 경주 서악동 삼존불 입상의 기계적 훼손과 보존과학적 접근. 지질학회지, 37권, p. 611-627.
- 조연태, 김창석, 강대일, 이명희 (2001) 회암사지 선각왕사비 보존처리. 회암사지 선각왕사비 보존. 국립문화재연구소, p. 11-41.
- 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운 (2000) 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여. 지질학회지, 36권, p. 335-340.
- 최석원, 이찬희, 남광우 (2001) 회암사지 선각왕사비의 암석학적 및 물리화학적 특성과 변화연구. 회암사지 선각왕사비 보존. 국립문화재연구소, p. 43-78.
- 최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희 (1999) 충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책. 충청남도, 조사연구보고서, 425p.
- Amoroso, G.G. and Fassina, V. (1983) Stone decay and conservation. Materials Science Monographs II, New York, Elsevier.
- Banfield, J.F. and Eggleton, R.A. (1990) Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite and K-feldspar weathering. Clay and Clay Minerals, v. 38, p. 77-89.
- 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.
- Chesworth, W. (1971) The major element geochemistry and the mineralogical evolution of granitic rocks during weathering. In Ahrens, L.H. (ed.), Origin and distribution of elements, Pergamon Press, Oxford, p. 305-313.
- Drever, J.L. and Zobrist, J. (1992) Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps. Geochem. Cosmochem. Acta, v. 56, p. 3209-3216.
- Lee, C.H., Choi, S.W., Suh, M. (2002) Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea. Geotechnical and Geological Engineering, v. 20, (in press).
- Lee, S.G. and De Freitas, M.H. (1989) A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. Quater. Jour. Engineer. Geol., v. 22, p. 31-48.
- 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. Geochem. Cosmochem. Acta, v. 62, p. 227-244.
- Nagano, T. and Nakashima, S. (1989) Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy. Geochem. Jour., v. 23, p. 75-83.
- 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.
- Price, C.A. (1996) Stone conservation. An overview of current research. The Getty Conservation Institute.
- Sharma, A. and Rajamani, V. (2000) Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, South India: Implications to neotectonics of the region. Chem. Geol., v. 166, p. 203-223.

2002년 5월 22일 원고접수, 2002년 8월 13일 게재승인.