

불국사 석가탑의 풍화훼손도 분석 및 기원암의 산지추정

이명성* · 이찬희* · 서만철** · 최석원**

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 지질환경과학과

Deterioration Analysis and Source Area on Rock Properties of the Seokgatap Pagoda in the Bulguksa Temple, Korea

Myeong-Seong Lee*, Chan-Hee Lee*, Man-Cheol Suh** and Seok-Won Choi**

**Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University*

***Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University*

Abstract

The Seokgatap pagoda composed of mainly alkali granite and other minor pink-feldspar granite, fine-grained granite, granodiorite, diorite, gabbro, and tuff. Despite the small loss and damage derived from joints, its peel-off and exfoliation are serious enough to cause the heavy deterioration on the stone surface. The chemical and petrological weathering has partly replaced the original rock-forming minerals with clay minerals and iron oxyhydroxides. Based on the petrogenesis, rock materials of the pagoda is very similar to rocks of Dabotap pagoda and the Namsan granite in the Gyeongju. The central part of the pagoda has sunken highly, which caused all the corners to split and the structural transformation to become worse. The reverse V-shaped gaps between the materials have broken stones filled in a coarse way. The iron plates inserted between the upper flat stone laid on other stones and the pagoda body in the north and east side has been exposed in the air and corroded, discoloring of the adjacent stones. The overall diagnosis of the Seokgatap

pagoda is the deteriorated functions of the stone materials, which calls for a long-term monitoring and plans to reinforce the stone surfaces. But the main body including the pagoda roof stone needs washing on a regular basis, and the many different cracks should be fixed with glue by using the fillers or hardeners designed for stone cultural properties after removing the cement mortar. In case of the replacement of the stone materials with new stones, it's necessary to examine the pagoda for the center of gravity and support intensity of the materials. The structural stability of the pagoda can be attained by taking a reinforce measure in geotechnical engineering and making a drainage. The ground humidity, which has aggravated weathering and structural instability, should be resolved by setting up a humidity reduction facility. The contamination of lichens and bryophyte around the pagoda and on the surface is serious. Thus biochemical treatments should be given too in order to prevent further biological damages and remove the vegetation growing on the discontinuous planes.

1. 서 언

통일신라는 많은 석조문화재를 남겨 놓았으며, 특히 토함산 주변의 불국사와 석굴암의 석조유물들은 1995년 유네스코에 의해 세계문화유산으로 지정될 만큼 빼어난 수준을 자랑한다. 불국사 삼층석탑은 1962년 12월에 국보 제21호로 지정된 석조유물로서, 신라 제35대 경덕왕 10년(751년)에 축조된 것으로 알려져 있는 높이 8.2 m의 석탑이다. 이 탑은 석가탑 또는 무영탑이라고도 불리며 석가의 상주설법을 상징한 것으로 신라의 많은 탑 중에서 가장 세련된 대표작이다.

경주 일대의 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. 또한 다량의 석재 채석장과 공급지 및 가공장소에 관한 연구도 거의 없는 것이 현실이며, 추정에 관한 언급은 있으나 과학적 근거가 부족하다. 한편 석조문화재의 풍화와 훼손은 기상학적, 암석학적, 생물학적 및 인위적인 요인이 복합적으로 작용한 결과

이기 때문에 안전진단과 보존처리 방안의 도출이 아주 어렵다.

석가탑도 오랜 기간 동안 풍화에 노출되어 있었기 때문에 옥개석과 기단석의 거의 모든 부분은 지의류에 의하여 피복되어 있다. 또한 암석 표면은 심한 풍화작용으로 인하여 박리와 박락 및 절리와 균열이 많이 생성되어 있으며 옥개석은 약한 충격에도 암편이 떨어져 나온다. 특히 지반의 구조적 불균형과 중심침하로 탑신과 기단부의 변형이 심각한 상황이다. 따라서 이 탑을 대상으로 지질학적, 암석학적, 생물학적 및 보존과학적 안전진단을 실시하였으며, 기원암의 암석학적 성인해석을 통하여 원산지를 추정하였다. 이 결과를 근거로 보존을 위한 과학적 방안을 제시하고 한다.

2. 연구방법

이 연구에서는 석가탑의 물리적 또는 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사가 실시되었으며, 석가탑에서 탈락된 암종에서 암석학적 및 광물학적 분석용 시료를 채취하였다. 또한 탑의 구조적 불안정, 균열상태와 박피 및 박리 장소에 관한 정밀조사가 수행되었다. 암석의 화학분석은 XRF, ICP, ICP-MS 및 INNA를 이용하여 정량분석 하였다. 석가탑을 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 X-선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimatzu 사의 ISI-SX-40 이다. 일부 시료에서 X-선 회절 분석을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIB였고, X-선은 CuK α 에 조건은 30 kV와 15 mA 였다. 조암광물의 상대적 함량비는 각각의 암석에 관한 박편을 대상으로 모드분석을 실시하여 계산하였다. 모드조성은 자동계수기가 장착된 Leitz사 모델의 Orthoplan 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다.

3. 현황과 암석학적 특징

석가탑의 구성은 일반적인 통일신라의 석탑과 비슷한 양식이나 각부의 비례가 아름다운 우수작의 하나이다(Fig. 1). 전체가 3층으로 2층의 기단위에 세워져 있는데, 기단부를 여러 개의 장대석으로 구축된 지대석 위에 올려놓았다.

탑의 탑신과 옥개석이 각각 한 개의 암석으로 다듬어져 있으며 옥개석은 받침이 5단씩이고 윗부분은 2단으로 만들어 그 위에 위층의 옥신을 받치고 있게 하였으며 탑의 상륜부는 3층 옥개석까지 찰주를 박고 구슬을 켜듯하게 배치하였다. 이 상륜부는 파손되어 1973년 남원 실상사 삼층석탑의 머리장식을 모방하여 복원한 것이다. 이 석탑의 주위에는 네모진 구곽을 설치하고 네 귀퉁이와 각 변의 중앙에 하나씩 8개의 등근 연화대를 설치하였다. 이 탑은 다보탑과 함께 1925년 일본인들에 의해 수리된 바 있다. 그러나 1966년 9월 도굴에 의해 탑이 손상되는 일이 있었다. 그해 12월 탑을 복원하면서 2층 탑신의 본체 앞면에서 사리를 모시던 사각형의 공간을 발견하였고, 여기서 사리용기와 무구정광대다라니경(국보 제126호)이 수습되었다.

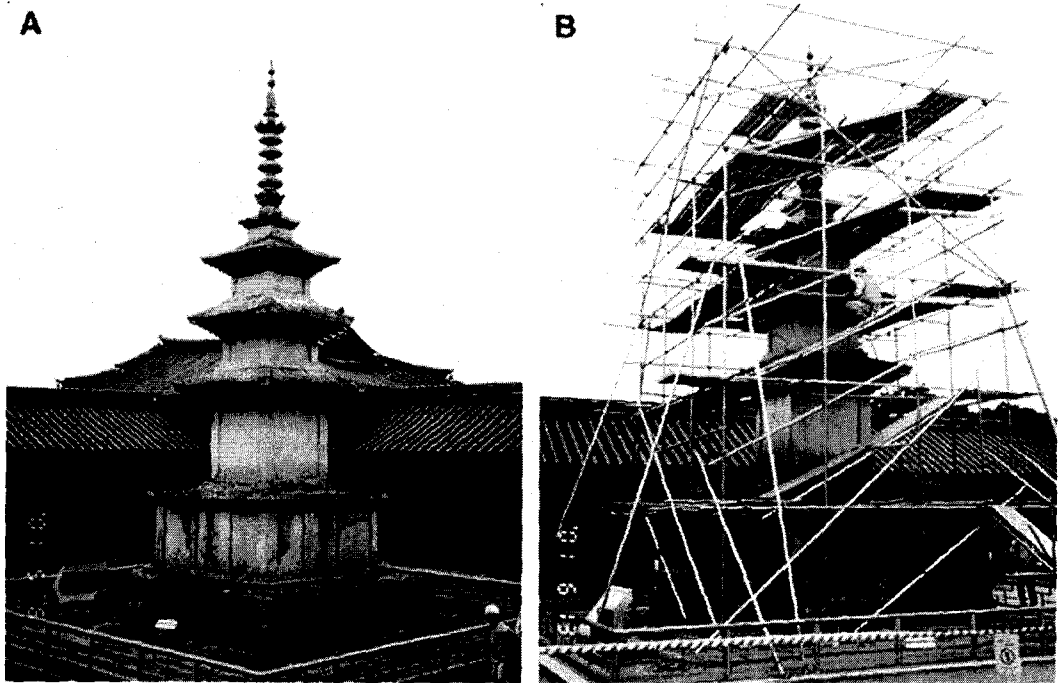


Fig. 1. Southeastern view of the Seokgatap pagoda in the Bulguksa temple. The pagoda is intensive contaminations on the surface rocks around the basement part. Photograph B set up the scaffold by stainless steel pipe and plates for detail survey.

좌용주 외(2000)는 석가탑의 연화대, 기단석, 지대석, 중석, 갑석, 탑신 및 1층 옥개석까지 모두 24개의 석재에 관한 관찰과 대자율을 측정하였다. 이 결

과 다보탑과 석가탑의 부재는 거의 동일한 특성을 갖고 있으며 암석학적으로 볼 때, 이준동과 황병훈(1999)이 보고한 남산화강암과 가장 유사함을 주장하였다. 그러나 불국사 다보탑의 석재는 구성광물과 조직으로 보아 불국사 및 토함산 지역에 분포하는 토함산 화강섬록암에 해당하는 것으로 보고된 바 있다(김수진 외, 2000). 이번 조사에서는 정밀한 육안관찰과 탑의 본체에서 탈락된 암편을 대상으로 현미경 관찰, X-선 회절분석 및 화학분석을 통하여, 석가탑의 구성암석은 알카리 화강암이며 이는 A-형 화강암으로 알려진 남산화강암과 동일한 것임을 밝혔다.

석가탑의 구성암석은 우백질의 조립질이고 등립질의 화강암으로 1~3 cm 정도의 정동을 포함한다. 이 정동에서는 석영, 알카리 장석, 전기석, 자철석의 자형결정이 성장하였다. 구성광물은 알카리 장석, 석영, 흑운모, 알카리 각섬석, 형석 등이며, 저어콘, 인회석, 자철석 등을 부수광물로 포함한다. 이 암석은 토함산 부근에 분포하는 흑운모 화강섬록암과는 전혀 다른 것이다. 상륜부의 일부 암석은 홍장석 화강암과 유색광물을 많이 함유하고 있는 흑운모 화강섬록암이다. 그러나 상륜부와 지대석 주변의 연화문석의 암석은 본체와 다른 섬록암, 반려암질 및 홍장석 화강암이 혼재한다. 그림 1은 불국사 석가탑의 남동쪽 전경으로서 전체적으로 기단부의 훼손과 암회색의 오염이 심함을 보여준다.

석가탑 구성암석의 SiO_2 함량은 71.38~78.11 wt %로서 거의 균질한 조성을 보이며 Al_2O_3 의 함량도 11.85~14.27 wt %로서 전형적인 산성 화성암의 범주를 나타낸다. 또한 Na_2O 와 K_2O 의 함량은 각각 3.51~4.54 wt %, 3.28~4.71 wt %로서 알카리 화강암에 속하며 다보탑의 조성과의 거의 동일함을 보인다(이찬희 외, 2003). 일반적으로 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO 및 TiO_2 의 함량은 부의 상관도를 보였으며 K_2O 의 함량은 정의 관계를 갖는다. 이는 화성암의 일반적 경향과 풍화에 의한 상대적인 소실효과가 반영된 것으로 판단된다. 이 화성암의 미량 및 희토류 원소 분석결과 Ba, Rb, Y, Zn, 및 Zr의 함량은 비교적 높은 함량을 가지며 조성의 변화폭도 크나, 전체적인 분화경향은 남산의 알카리 화강암과 유사하다.

4. 기원암의 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 석가탑, 다보탑 및 남산 화강암의 주성분 원소에 대하여 부화와 결핍정도를 비교하고자 일반적인 화강암의 평균 함량(Nockolds and Allen, 1954)을 기준치로 표준화하였다. 그 결과 모든 시료에서 남산 화강암과 동일한 함량변화와 거동 특성을 갖는 것으로 보아 양자의 성인적 동질성이 인정된다.

이 암석들의 일부 미량 및 희토류 원소의 함량은 동일 종류의 알카리 화강암과 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 Pearce (1983)의 조성으로 표준화 한 결과, 모든 시료에서 동일한 경향과 거동특성을 보였다. 한편 이 시료의 일부 희토류 원소 함량을 Boynton (1984)의 조성으로 표준화 하였을 때, 모든 시료에서 동일한 분화경향을 보였으며, 남산 화강암과도 동일한 경향을 보였다.

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. 따라서 위의 결과들을 종합할 때, 석가탑의 부재와 남산 화강암은 생성과정과 조건이 아주 유사한 동일 종류의 암석으로 해석된다.

5. 풍화와 훼손도 진단

석가탑의 구조적 불안정은 주로 지반의 영향을 받았다. 여기에서는 지반의 불안에서 야기된 암석학적 문제점만을 간단히 기술하기로 한다. 석가탑은 지반의 약화에 따른 본체의 불안이 가중되어 기단부의 각 면과 모서리, 탑신의 면이나 모서리에서 이격이 아주 심하며 중앙부는 침강하고 양단은 융기한 중심침하가 있다. 풍화가 진행됨으로 암석의 강도가 약해지고 탑의 구조적 불균형에 의한 하중의 편중에 의하여 1층 탑신부 바로 밑 기단석 상부의 각 부재는 역 V자 형으로 벌어져 있다. 석가탑에 나타난 부재의 이격정도는 거의 모든 부재사이에 넓은 간격을 보이며 지대석과 탑신부에서는 구조적 불안을 야

기할 정도로 불균형이 심한 상태이다. 2층 옥개석은 이미 심한 균열이 생성되어 있어 이를 충전한 시멘트 몰탈이 흉하게 노출되어 있다.

석가탑 구성암석의 장식류는 견운모와 고령석으로 변질되어 있음을 보여준다. 흑운모도 입자경계나 벽개면을 따라 녹니석, 녹염석 및 철 수산화 광물로 교대되었다. 이를 전자현미경에서 관찰하면 장식들은 용식에 의하여 많은 공극이 발달된 것을 볼 수 있고, 시멘트 몰탈이 용해되어 회백색 침전물을 형성한 곳에서는 석고 결정이 나타난다. 공극과 입간에는 이차적으로 생성된 불석균의 점토광물과 자형으로 성장한 고령석 및 견운모의 집합체가 관찰되며, 장식의 표면에는 미정질의 견운모 입자가 피막을 형성하였다. 유색광물과 장식의 표면에 피막을 형성한 고령석은 각질을 형성하며 박피현상을 야기하였다. 또한 탑신과 옥개석 사이에 삽입된 철판의 산화에 의하여 생성된 황갈색 수산화철의 침전물이 노출되어 있으며, 암석에 함유된 철과 강수의 반응에 의하여 유동한 황갈색 철산화물도 관찰된다.

이 탑은 생물학적 오염이 가중되어 있으며 균류, 조류, 지의류나 선태류들은 암석의 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출된다. 지의류에 따른 피도를 보면 40~50 %로 부착생물의 번식이 아주 심각한 수준이며, 옥개석은 90 % 이상의 피도를 보인다. 옥개석의 암석은 표면으로부터 1.5 cm 깊이까지도 조암광물의 공극에서는 2~3 μm 정도의 두께를 갖는 지의류의 포자근과 균사 (*Crustose lichen's rhizoid*)가 서로 엉켜있다. 또한 석영과 장식의 입간공극을 침투한 지의류의 포자근과 균사, 이차적으로 생성된 점토광물과 결합되어 조암광물의 입간을 충전하는 등, 아주 다양한 형태의 생물학적 풍화현상을 관찰할 수 있다.

6. 보존상의 문제점과 대책

석가탑은 오랜 세월동안 강수, 대기오염 물질 및 수분, 관람객이 발산하는 탄산가스 등과 계속적인 반응을 해왔기 때문에 풍화와 훼손이 가중되어 있다. 또한 암석자체의 결함에 의하여 많은 정동이 발달되어 있고, 이 정동은 계속 커지게 될 것이다. 그러나 이와 같은 요인을 차단하기는 극히 어려운 상태이다. 보호각을 지어 관리하기 이전에는 탑에 영향을 미치는 모든 수분의 유지시간을 최대한 단축시키는 것이 필요하다. 특히 각 층의 옥개석에는 각종 수분과 반응에 의하여 풍화도가 극에 달해있으며, 시멘트 몰탈이 처리된 부분과

철편이 삽입된 부분에서는 회백색 및 황갈색 침전물과 자생한 결정질 광물 및 하등생물도 번성하고 있다. 이는 강수의 침입이 자연스럽게 배출되지 못하고 흡수되어 스며 나오기 때문이다. 따라서 강수가 스며드는 것을 방지하기 위한 방수처리가 필요할 것이다.

한편 지대석의 부재별 이격과 사이에 충전된 잡석은 기단석의 용기혼적과 서로 어긋나 뒤틀림이 발생하였다. 중심의 좌우로 용기된 지대석과 이를 지지하는 잡석의 충격으로 인한 균열대도 관찰된다. 석가탑에 나타난 부재의 이격 정도는 거의 모든 면에서는 넓게 나타나며, 특히 지대석과 탑신부에서는 구조적 불안을 야기할 정도로 불균형이 심한 상태이다. 이 탑에 나타난 부재의 박리, 박락, 소실 및 시멘트 몰탈 등, 차후에 보존처리가 되어야 할 부분은 상세히 기록해 두었다. 대부분의 부재별 이격과 균열은 기단부의 구조적 불안에서 야기된 것으로 보인다. 따라서 예술적 가치를 훼손하지 않는 범위에서 지반의 구조적 안정을 위한 지질공학적 보강과, 열극계의 보수가 시급한 실정이다. 그러나 더욱 중요한 문제는 현재 본체의 안정도를 좌우하고 있는 지반에 대한 지질공학적 보강이 최우선 과제이다.

지대석 및 기단석에 나타난 균열과 유실된 부분은 동일 종류의 부재를 선택하여 교체하거나 접합해야 할 것이다. 부재의 연결부위에 충전한 시멘트 몰탈과 삽입된 철편은 제거한 후에 석조문화재 보존처리용 충전제와 경화제를 이용하여 보존관리를 해야 할 것이다. 이에 관하여는 김사덕 외(1999), 엄두성 외(1999), 이찬희 외(2003), Lee et al.(2003)에서 논의된 바 있다. 향후 보존처리와 관리를 위하여 모서리 마모와 미세균열 및 박리와 박락에 관한 지속적인 모니터링과 측정이 수행되어야 할 것이다. 또한 표면에 피복된 지의류를 비롯한 하등생물을 제거하기 위한 생화학적 처리도 요구된다. 이차적 오염현상인 황갈색 수산화철과 암흑색 망간수산화물, 암석의 변색과 강수의 유동흔적을 따라 나타나는 암회색 침전물, 강수를 배출하기 위한 도수통로 주변의 암갈색 오염물질 및 각종 오물의 잔류물을 제거하기 위한 체계적인 세정방법이 도입되어야 한다. 그러나 보존처리 부분의 표면이 자외선, 대기환경, 습도 등의 기상변화에 의하여 색이 변하고 균열이 발생하는 문제점이 발생할 수 있으므로 시약의 선택이나 시공에 각별한 주의가 필요하다.

7. 결론 및 제언

1. 석가탑의 구성암석은 알카리 화강암이나 부분적으로 담홍색 화강암, 세립질 화강암, 화강섬록암, 섬록암, 반려암, 응회암을 혼용하였다. 이 탑은 절리에 의한 탈락과 훼손은 적은 편이나 박리와 박락현상이 발생하고 있어 석재의 표면이 심하게 부서지고 있다. 이 암석의 조암광물은 화학적 및 광물학적 풍화에 의해 점토광물과 철수산화 광물로 교대되어 있다. 암석의 성인적 특성으로 볼 때, 다보탑과 석가탑의 부재는 거의 동일한 특성을 가지고 있으며 경주의 남산화강암과 가장 유사하다.

2. 석가탑은 중심부의 침하가 심하여 모든 모서리가 들떠있는 구조적 변형이 심각하며, 부재와 부재사이가 역 V자형으로 벌어져 있어 잡석이 조악하게 충전되어 있다. 북쪽면과 동쪽면의 상대잡석과 1층 탑신 사이에 삽입된 철판이 노출되어 있으며 부식으로 주변부의 암석이 변색되고 있다. 전반적으로 석재 자체의 성능이 저하되어 있으므로, 장기적인 모니터링과 함께 석재의 표면을 강화할 수 있는 처리방법을 강구해야 할 것이다.

3. 현재로서 교체해야 할 부재는 없는 것으로 보이나 옥개석을 비롯한 본체는 정기적인 세정이 필요할 것이며, 곳곳에 발생된 균열은 접착제로 보강해야 할 것이다. 시멘트 몰탈을 제거하고 석조문화재용 충전제 또는 경화제를 이용한 보수가 필요하다. 석탑의 부재를 새로운 암석으로 교체할 경우를 대비하여 석탑의 무게중심과 구부재의 지지강도를 검토하여 새로운 석재를 선정하거나 구부재에 강도를 증가할 수 있는 보강제를 연구해야 할 것이다.

4. 본체의 구조적 안정을 위한 지반공학적 보강방법과 배수로의 설치가 강구되어야 할 것이다. 또한 이 탑의 풍화와 구조적 불안을 야기하는 지면의 습도를 저감하기 위한 시설도 고려되어야 한다. 본체의 주변과 암석의 표면에는 지의류와 선태류의 오염이 심각하며, 절리대는 토양화의 진행에 의하여 잡초가 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있다. 따라서 생물학적 훼손과 불연속면에 서식하는 식생을 제거하기 위한 생화학적 처리도 필요하다.

참고문헌

- 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 에폭시수지 개발 시험연구. 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20, 139-155.
김수진, 여상진, 장세정, 성소영, 이범한 (2000) 불국사 다보탑의 훼손현황과 보존대책. 한국문화재보존과학회, 제12차 학술회의 논문집, 19-26.

- 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 발수경화제 시험연구(I). 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20, 155-173.
- 이준동, 황병훈 (1999) 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 80-95.
- 이찬희, 이명성, 서만철, 최석원 (2003) 불국사 다보탑의 암석학적 특징과 보존과학적 진단. 지질학회지, 39, 319-335.
- 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운 (2000) 경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여. 지질학회지, 36, 335-340.
- Boynton, W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In Henderson, P. (ed.), Rare earth element geochemistry, Elsevier, 63-107.
- 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, 21, 63-77.
- 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. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 62, 227-244.
- Nockolds, S.R. and Allen, R. (1954) Average chemical compositions of some igneous rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 65, 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.