

하남시 춘궁동 오층석탑의 암석학적 및 보존과학적 훼손도 평가

이찬희^{1*} · 서만철² · 채상정¹ · 정연삼² · 이호민²

¹공주대학교 문화재보존과학과, ²공주대학교 지질환경과학과

Petrological and Conservational Scientific Deterioration Assessment of the Chungung-dong 5-Storied Stone Pagoda, Hanam City, Korea

Chan Hee Lee^{1*}, Mancheol Suh², Sang Jeong Chae¹, Yeon Sam Jeong² and Hyo Min Lee²

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 Chungung-dong 5-storied pagoda (Treasure No. 12) in the Hanam, Korea was studied on the basis of petrological weathering and deterioration diagnosis. Frontal part of the pagoda is looked out on the N30°W. Constitution rocks of this pagoda show augen gneiss and biotite granite. Host rock of the pagoda was highly exfoliation and discoloration, therefore most rock-forming minerals were altered to the clay minerals due to the mineralogical and chemical weathering. Open cavity and rock surface occur partly green and black patches because of contamination by algae, lichen and moss, and the lower part of the pagoda is transition to the some weeds. This biological problems are need for cleaning and chemical treatments. For the structural stability, the pagoda is rebuilt without open gap between the each rock materials. All iron plates eliminate from the difference gap of the rock materials, and properly conservation treatments need to be repaired petro-filler for stone cultural properties and water curtain for the humidity attenuation of the ground.

Key words : deterioration diagnosis, augen gneiss, biotite granite, structural stability, conservation treatment

춘궁동 오층석탑(보물 제12호)의 암석학적 풍화와 훼손도를 진단하였다. 이 석탑의 정면은 N30°W를 향하고 있으며, 구성암석은 안구상 편마암과 흑운모 화강암이다. 석탑을 이루는 암석은 박리와 변색이 심하고, 조암광물은 화학적 및 광물학적 풍화에 의하여 점토광물로 변질되어 있다. 석탑의 표면과 부재사이에는 지의류와 이끼류의 모근 및 포자류가 기생하고 있으며, 하단부는 이미 고등식물이 천이하고 있다. 따라서 석탑의 표면에 피복된 지의류와 불연속면에 서식하고 있는 잡초를 제거하기 위한 생화학적 처리가 요구된다. 이 석탑의 구조적 안정을 위해서는 부재사이에 틈이 없도록 재조립을 해야 하며, 삽입한 철판도 제거한 후에 석조문화재 보강용 충전제를 이용한 보존처리가 필요하다. 또한 석탑에 미치는 지면의 습도를 저감하기 위한 차수층의 설치도 고려되어야 할 것이다.

주요어 : 훼손도 진단, 안구상 편마암, 흑운모 화강암, 구조적 안정, 보존처리

1. 서 언

경기도 하남시 춘궁동 466번지에 있는 이 석탑은 보물 제12호로 지정된 석조문화재로서 이종기단 위에 오층의 탑신을 형성한 전형적인 일반형 석탑이다. 상하기단의 면석과 갑석은 여러 장의 석재로 구성되어 있고, 상층기단 갑석에는 얇은 부연이 있다. 기단의 네 모서

리와 면의 가운데에 기둥 모양을 새겨두었는데, 남쪽 면이 부서져 있어 안쪽으로 커다란 기둥돌이 들어나 있다. 이 탑의 특징은 탑신부에 잘 나타나 있다. 1층의 탑신석은 2단인데, 아랫단을 4개의 네모난 암석으로 만들고, 그 위에 1장의 암석을 얹어 놓았다. 이러한 예는 광주서오층석탑(보물 제109호)에서도 볼 수 있듯이 고려시대에 나타난 새로운 양식이다(문화재청, 2003).

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

옥개석을 구성하는 암석은 1층과 2층 및 3층은 4장, 4층은 2장, 5층은 1장을 올렸다. 옥개석은 밑면에 1층은 5단, 2~4층은 4단, 5층은 3단의 받침을 두었는데, 이러한 구성은 탑신부가 위로 갈수록 강하게 체감하는 느낌을 갖게 하는 것이다. 옥개석 아래는 수평을 이루어 반듯하며, 경사는 완만하면서도 네 귀퉁이 선이 뚜렷하게 치켜 올려져 있어 경쾌하다. 탑의 꼭대기에는 머리장식으로 노반을 이루고 있는 암석만 남아 있다. 구조상 불규칙적인 면이 있으나, 각 부분의 끝맺음마다 규칙성이 느껴지고 탑신의 비례도 조화로운 우수한 작품이다.

지붕돌 모서리의 치켜 올려진 정도나 기단을 2단으로 구성한 점 등은 통일신라 후기 석탑양식의 전형을 따른다고 볼 수 있다(Fig. 1). 그러나 지붕돌 받침수가 3단에서 4단으로 줄어든 점이나, 기단의 가운데에 새긴 기둥의 수가 줄어든 것으로 미루어 고려 전기인 10세기 후반에 만들어진 것으로 보인다(문화재청, 2003). 이와 같은 석조문화재에 대하여 고고미술사학적 연구는 많으나, 국내에 분포하는 석조문화재에 대한 지질 및 암석학적 특징과 풍화에 관한 연구(이상현, 1998; 최용주 등, 2000; 이찬희 등, 2000; 2001; 2003; 최석원과 이찬희, 2000; 최석원 등, 1999; 2001; Lee *et al.*, 2003)은 아직 초기 단계로서 체계적인 많은 연구가 필요로 하고 있다.

이 연구에서는 춘궁동 오층석탑을 구성하고 있는 안구상 편마암과 흑운모 화강암을 대상으로 암석학적 특성, 풍화양상 및 보존상태를 검토하였다. 이 결과는 춘궁동 오층석탑을 이루고 있는 재질의 물리적 및 화학적 변화와 생물학적 영향에 따른 정량적인 풍화훼손도를 규명할 수 있을 것이며, 이를 기초로 보존을 위한

과학적 방안을 도출하였다. 또한 이를 정량화하여 이와 유사한 석조문화재의 보존연구를 위한 자료로 활용할 것이다.

2. 연구방법 및 주변지질

2.1. 연구방법

이 연구에서는 하남시 춘궁동 오층석탑을 대상으로 석탑의 균열상태와 박리 및 박락 위치에 대한 야외정밀조사 및 실내실험이 수행되었으며, 암석학적 보존대책에 관한 검토가 있었다. 현장에서는 육안관찰을 통해 암석의 조성, 인위적 및 자연적 훼손정도 조사를 실시하여 훼손도를 작성하였다. 또한 실내연구를 위하여 석탑에서 박리 및 박락에 의해 탈락된 암편과 석탑 주변에 분포하는 본체와 동일한 암종에서 암석학적 및 광물학적 분석용 시료를 채취하였다. 실내에서는 편광현미경을 이용하여 이 석탑에 대한 구성암석의 반정량적인 광물조성, 광물학적 공생관계, 조직과 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하였다.

암편의 화학분석은 X선 형광분석기(XRF)를 이용하였으며 분석기기는 Rigaku제 모델 RIX 2100이다. 조암광물의 상대적 함량비는 각각의 암석에 관한 박편을 제작하여 전통적인 방법에 따라 모드분석을 실시하여 계산하였다. 모드조성은 자동계수기가 장착된 편광현미경을 이용하였다. 또한 암석의 광물조성과 이차적 변질광물을 밝히고자 일부 시료에서 X선 회절분석을 실시하였다. 분석기기는 D/Max-2500이고, X선은 $\text{CuK}\alpha$ 에 조건은 20 kV와 15 mA였다. 한편 JEOL사의 JSM-6335F 모델인 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 석탑을 구성하는 석재의 점토화 상태,

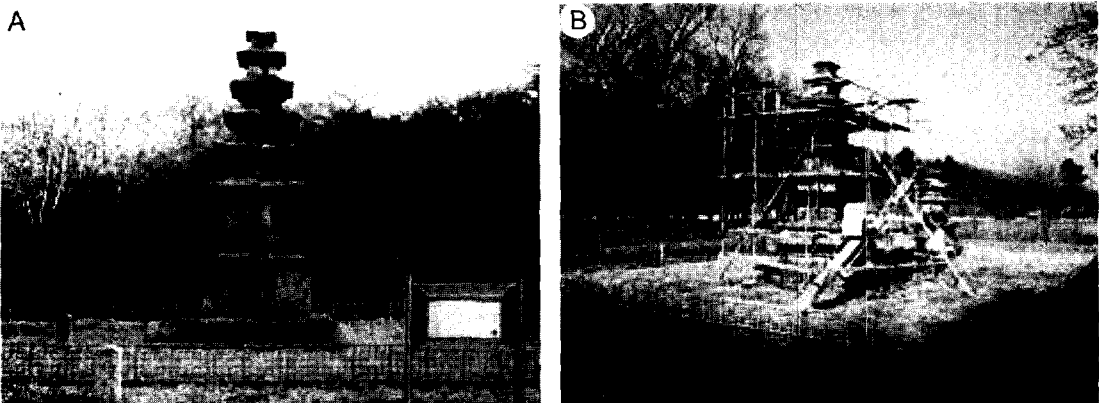


Fig. 1. Southern frontal view of the Chungung-dong 5-storied pagoda (A). There are totally intensive contaminations on the rock surface of the pagoda. Photograph B set up the scaffold by stainless steel pipe and plates for detail survey.

광물종 및 석재표면의 생물모근에 의한 생물학적 변화를 관찰하였다.

2.2. 지형 및 지질

이 석탑은 경기도 하남시 춘궁동 저수지에서 300m 정도 남쪽에 있다. 석탑 전면에는 대원사라는 사찰이 있고, 이 사찰 앞으로 구리·판교 간 고속도로가 지나고 있다. 석탑 뒤쪽으로는 높이 322m의 금암산이 병풍처럼 둘러싸고 있다. 이 지역은 침열하는 광주산맥의 서쪽부에 위치하고 있어 대체로 구릉성 산지를 이루고 있고, 사면에서는 암석의 화학적 풍화작용이 왕성하다. 전반적인 지형은 암석종류의 분포에 따른 차이는 거의 찾아 볼 수 없으며, 지형윤회로 보아 노년기 지형에 속한다(원종관 등, 1981).

춘궁동 일대는 경기육괴 내에 놓여 있으며 지질은 선캠브리아기에 속하는 편마암복합체와 홍적층 및 충적층 등으로 구성된다(원종관 등, 1981). 이 석탑 부근

의 기반암은 안구상 편마암으로 외견상 반상변정질 편마암과 유사하나 석영 및 장석의 반상변정 모양이 렌즈상 혹은 안구상을 하고 그 주변부에 흑운모의 편마구조가 뚜렷하다. 또한 안구상 반상변정의 장축도 엽리에 평행하게 발달되어 있다. 이 엽리의 방향은 N30°~70°E가 보통이다. 안구의 크기는 장경이 5cm 내외이고, 단경은 3cm 정도이다. 이러한 안구상 구조를 나타내는 부분을 제외하면 이 암석은 호상편마암과 유사하며 또한 점이적인 호상구조로 변한다.

3. 암석학적 특징과 풍화

3.1. 암석학적 특징

석조문화제에 대한 연구에서 가장 어려운 부분은 석재의 정확한 암석학적 감정이다. 이미 상당히 풍화되어 있어 원암의 조직과 조성을 보존하지 않은 경우가 대부분이며, 문화제의 특성상 시료 채취가 어려워 오

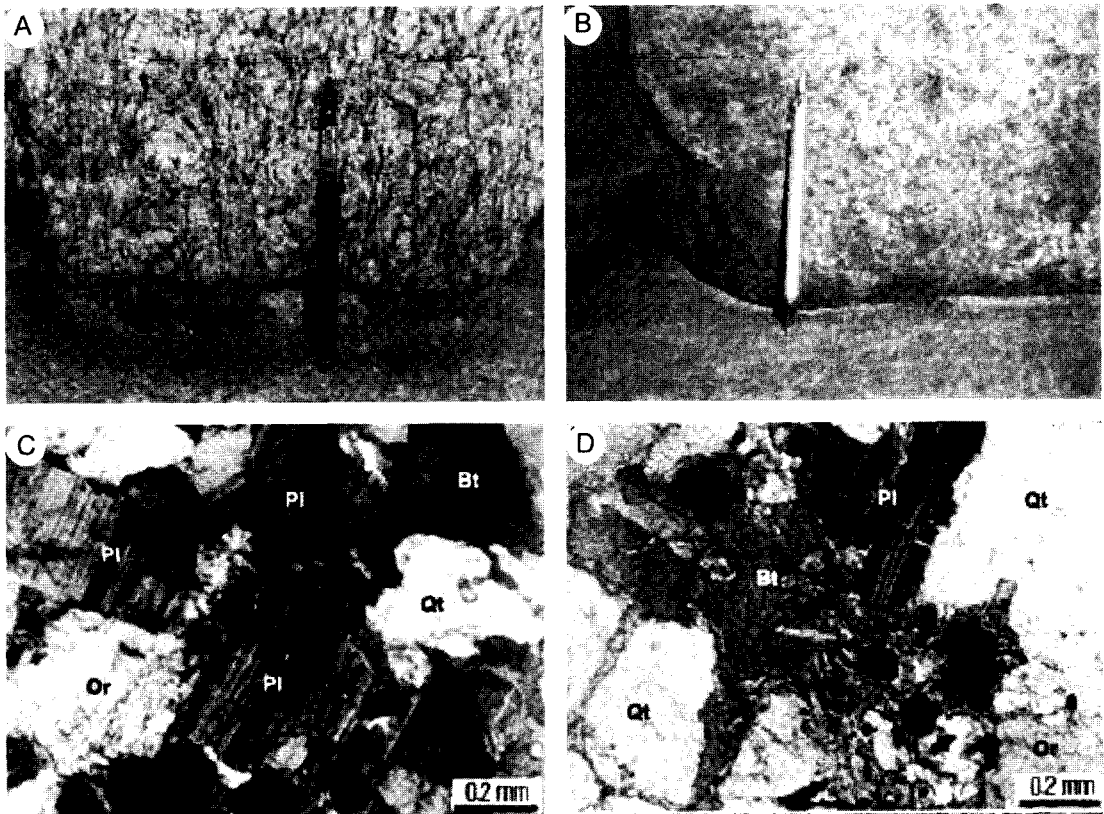


Fig. 2. Constituting rocks and microphotographs of the Chungung-dong 5-storied pagoda. (A) Broken basement rock and 1st floor body rock consist of augen gneiss. (B) Fractured roof rock and broken upper most rock materials composed of biotite granite. (C) Granular textured augen gneiss occurred of biotite, plagioclase, orthoclase and quartz, which show some alterations along the grain boundary and cleavages. (D) Quartz, plagioclase, orthoclase, biotite and opaque mineral assemblages of the biotite granite, which feldspar and biotite are highly alterations. Qt; quartz. Pl; plagioclase. Or; orthoclase, Bt; biotite.

로지 육안관찰로 표면을 조사해서 판정해야 하기 때문이다. 따라서 석재의 정확한 감정이란 아주 어려운 일이다. 이 연구에서는 석탑의 옥개석과 탑신의 박리작 용에 의해 떨어져 나온 암편을 회수하여 석재의 감정에 이용하였다.

춘궁동 오층석탑 부재를 구성하는 암석은 흑운모가 많은 안구상 편마암과 흑운모 화강암이다. 지대석부터 1층 탑신까지는 안구상 편마암으로 이루어져 있으며, 1층 옥개석에서 노반까지는 흑운모 화강암으로 이루어져 있다(Fig. 1). 안구상 편마암을 구성하는 안구의 크기는 최소 1cm에서 최대 5cm 정도로 비교적 엽리가 잘 발달되어 있다(Fig. 2A). 부분적으로는 미그마타이트질 암상을 보이며 석영세맥이 관찰되기도 한다.

이 암석을 편광현미경하에서 관찰하면 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모 등이 산출되며(Fig. 2C), 안구는 주로 사장석과 석영의 집합체로 구성되어 있다. 석영은 조립질로서 심하게 파쇄되어 있으며 봉합상 조직과 세리에이트 상태로 산출되며 파동소광을 한다. 안구의 주변에는 엽편상의 흑운모가 장축방향과 거의 나란하게 배열한다. 대부분의 장석과 흑운모는 입자경계와 결정조직을 따라 점토화 작용을 받았다.

흑운모 화강암은 중립내지 조립의 등립질 입상조직을 보이며 부분적으로 반정질 조직을 갖는다(Fig. 2B). 이 화강암의 모드분석 결과를 보면 석영 43%, 알카리 장석 31%, 사장석 22%를 함유하고 있으며, 사장석은 주로 알바이트(albite)와 칼스바드(carlsbad) 쌍정을 이루고 있다. 흑운모는 5% 미만으로 갈색을 띠며 주변에 세립의 불투명 광물이 관찰된다(Fig. 2D). 이 외에도 스피넬, 인회석 및 저어콘이 미량 산출된다. 또한 대부분의 장석류는 점토화 또는 건운모화 작용을 받았으며, 정장석은 입자전체가 균질하게 변질되었지만 내부가 외각보다 심한 변질을 받았다.

이 석탑을 이루는 암석의 조암광물을 정확히 동정하기 위해 X-선 회절분석을 실시하였다(Fig. 3). 회절분석 결과, 안구상 편마암(CS 5)과 흑운모 화강암(CE 2, CS 4)은 거의 동일한 광물조성인 흑운모, 석영, 사장석, 정장석 및 녹니석이 검출되었다. 이 녹니석은 두 종류의 암석 모두에서 공통적으로 흑운모의 입자경계나 벽개면을 따라 생성된 것으로 보아(Fig. 2C, 2D), 동일한 변질과정을 경험하였을 것으로 판단된다.

3.2. 광물 및 화학적 풍화

암석의 화학적 및 광물학적 풍화는 주로 조성광물의 용해, 이온교환, 수화, 가수분해, 산화-환원 및 탄산화

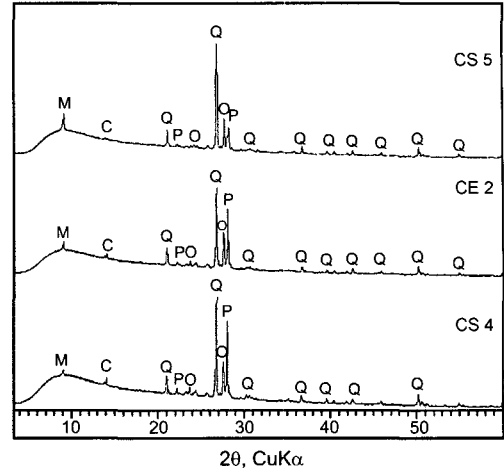


Fig. 3. X-ray powder diffraction patterns showing rock properties of the Chungung-dong 5-storied pagoda. Q; quartz, P; plagioclase, O; orthoclase, C; chlorite, M; mica group minerals.

작용 등으로 구분되나 대부분은 서로 복합적으로 작용하여 암석의 구성성분 및 조직을 파괴한다. 이 석탑주변에 탈락되어 있는 안구상 편마암과 흑운모 화강암을 선택하여 주성분 원소 분석을 실시하였다. 일반적으로 풍화환경에서 원소의 상대적인 거동을 표현하기 위해 흔히 Al_2O_3 , TiO_2 및 Fe_2O_3 중에 하나를 고정성분으로 사용하나, 이 석탑표면에는 점토광물이나 철수산화 광물들이 생성되어 있어 이들을 고정성분으로 풍화에 의한 원소의 거동을 설명하기는 어려울 것이다.

Table 1은 안구상 편마암(N형)과 흑운모 화강암(G형)의 전암 화학분석 결과를 상대적 풍화도에 따라 다소 신선한 것(F)과 다소 풍화 받은 것(W)으로 세분하여 표현한 것이다. 각 시료의 전암 화학분석 결과, TiO_2 와 Fe_2O_3 는 두 암석 모두 풍화가 심한 시료에서 증가하였고, Al_2O_3 는 감소하였다. 안구상 편마암은 풍화를 받지 않은 시료보다 풍화를 받은 시료에서 MnO와 MgO 증가를 CaO와 Na_2O 는 감소하는 경향을 나타내었다. 흑운모 화강암에서는 풍화 받지 않은 시료보다 풍화 받은 시료에서 P_2O_5 는 증가하고 K_2O 는 감소하는 경향을 보였다.

각각의 주성분 원소 분석결과에 대하여 부화와 결핍 정도를 비교하고자 일반적인 화강암의 평균함량(Nockolds and Allen, 1954)을 기준으로 표준화하였다. 이 부화계수(enrichment factor)는 1을 기준으로 높은 값은 부화를 낮은 값은 결핍을 의미한다. 춘궁동 오층석탑을 이루는 편마암의 부화계수는 보통의 암석에 비하여 TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, CaO는 부화되어 있

Table 1. Major element concentrations (wt.%) for rock materials of the Chungung-dong 5-storied pagoda.

Elements	FN-1	WN-1	WN-2	FG-1	WG-1	WG-2
SiO ₂	70.80	68.81	71.50	72.76	73.67	74.93
TiO ₂	0.22	0.49	0.53	0.05	0.10	0.06
Al ₂ O ₃	15.87	14.14	13.45	14.04	13.69	13.63
Fe ₂ O ₃	1.84	5.75	4.62	1.46	1.71	1.63
MnO	0.02	0.07	0.06	0.05	0.07	0.05
MgO	0.36	2.01	0.86	0.08	0.18	0.07
CaO	3.07	0.90	1.84	1.35	1.93	0.98
Na ₂ O	3.99	0.78	2.54	3.82	3.74	3.90
K ₂ O	2.52	2.43	3.32	4.21	3.53	3.64
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.05	0.02	0.06	0.06
LOI	0.95	3.94	1.07	1.64	0.83	0.61
Total	99.69	99.37	99.84	99.48	99.51	99.56
CIA*	51.62	71.81	54.75	51.36	50.38	52.90
WPI**	4.06	13.41	10.39	3.77	4.28	4.36

Fe₂O₃; as total FeO, CIA*; chemical index of alteration, WPI**;
weathering potential index by Nesbitt and Young (1982).

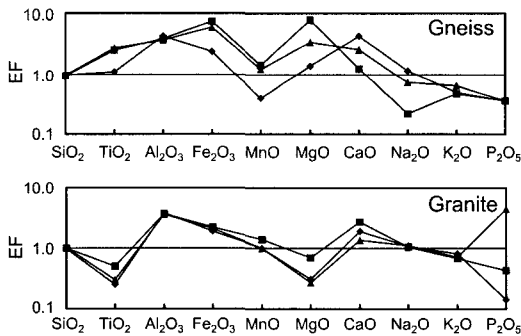


Fig. 4. Diagrams showing enrichment and deficiency factors of major elements for the rock properties of the Chungung-dong 5-storied pagoda.

으며, K₂O와 P₂O₅ 및 Na₂O는 결핍되어 있음을 보인다. 그러나 SiO₂의 함량은 거의 변화가 없었다. 흑운모 화강암의 경우는 Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, CaO가 부화되었고, TiO₂와 MgO 및 K₂O는 결핍되어 있으며 SiO₂와 Na₂O는 거의 1에 가까웠다(Fig. 4). 양자 모두에서 Al₂O₃, Fe₂O₃ 및 CaO의 함량이 증가한 것은 각각 조암광물의 점토광물화 작용, 철수산화 광물의 생성, 회백색 침전물의 생성에 따른 상대적 부화가 있었기 때문으로 해석된다.

암석의 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

Al₂O₃에 대한 알카리 원소의 변화를 나타내는 것으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 지시한다. 풍화잠재지수는 0을 기준으로 양의 값을 보이면 화학적인 풍화작용에 민감하다는 것을 지시한다. 이 석탑의 CIA는 편마암=51.62~71.81이며 화강암=50.38~52.90이다. 한편 WPI는 편마암=4.06~13.41, 화강암=3.77~4.36으로, 현재 암석의 화학적 풍화작용이 왕성하게 발생하며 풍화잠재력도 높은 것으로 해석된다.

암석의 변질정도는 주로 풍화대의 변색정도나 기계적인 충격을 주어 측정하기도 하나, 주사전자현미경에 의한 풍화정도의 추정은 겉보기 분류보다 구체적인 변질정도를 제공한다. 일반적으로 장석은 변질이 진행됨에 따라 표면적과 부피가 상당히 감소한 반면에 점토광물의 양은 증가된다. 따라서 석탑 부재의 암석 중에서 박리작용에 의해 떨어진 암편을 이용하여 주사전자현미경을 조사한 결과, 편마암과 화강암 모두에서 점토광물인 튜브상의 활로사이트가 관찰되었다(Fig. 5A, 5B). 이는 사장석 입자의 사이와 결정면에서 산출되는 것으로 보아 사장석의 풍화산물일 것으로 추정된다.

3.3. 생물학적 풍화

우리나라의 석조문화재에서 나타나는 생물오염과 풍화작용도 이미 보고 된 바 있다(최석원 등, 1999; 이찬희 등, 2003; 이찬희와 서만철, 2002). 특히 균류, 조류, 지의류나 선태류들은 암석의 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출된다. 이들이 성장을 멈추면 암흑색 또는 흑갈색으로 변색되어 미관을 해치는 것은 물론 암석의 풍화를 촉진시키는 것이다. 유기물은 토양층에서 중요한 발생학적 요인을 구성할 뿐 아니라 암석의 분해와 풍화작용에 아주 중요한 부분을 차지한다. 보통의 식물체 뿌리가 토양 또는 암석에 압력을 가하며 뿌리 끝에서 강산성 분비물을 발생시켜 암석을 부식시키는 강력한 화학적 풍화작용을 초래하며, 식물의 호흡작용과 증발작용도 화학적 풍화에 중요한 역할을 한다(Billings, 1950; Brooks, 1972).

춘궁동 오층석탑을 이루는 암석의 주사전자현미경 관찰 결과, 두 종류의 암석 모두 장석과 흑운모의 입자경계에서는 지의류가 성장하고 있었다. 이는 보통 1~3 μm 정도의 두께를 갖는 포자근과 균사로서 박리된 것의 깊이가 0.5~1cm 사이인 것으로 보아 표면에서 0.5cm 깊이의 암석내부에 있는 조암광물의 공극과 입자경계까지 영향을 주었을 것이며, 최소 3cm 깊이까지 토양화가 진행된 것으로 판단된다(Fig. 5C, 5D). 이

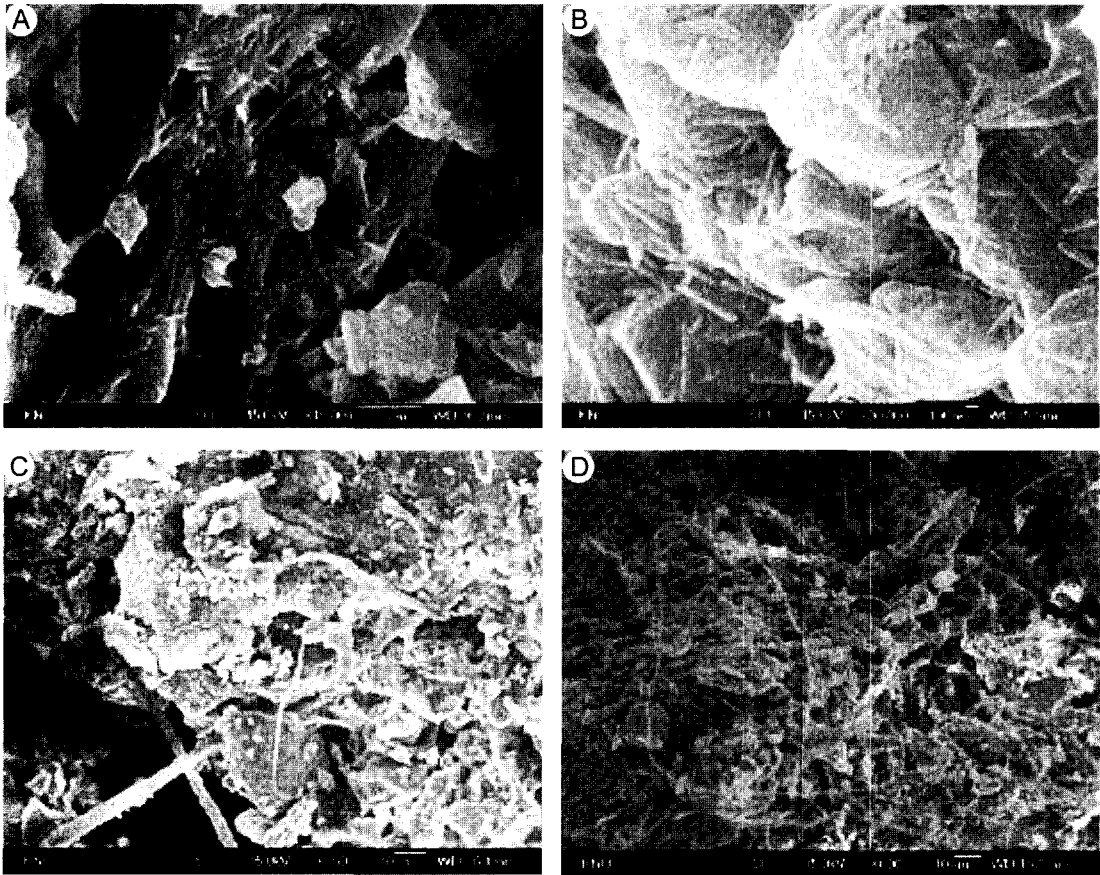


Fig. 5. Scanning electron microphotographs (SEM) showing secondary minerals and organic matters of the Chungung-dong 5-storied pagoda. (A) Tube-like halloysite aggregates occurred with between plagioclase and biotite in the augen gneiss. (B) Long tube halloysite showing the plagioclase open cavities in the biotite granite. (C and D) Rootlets and fungus of lichen grown into the grain boundaries of the augen gneiss and biotite granite, respectively.

런 곳에서는 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화가 진행되어 있어 약한 충격에도 암편이 쉽게 떨어져 나온다. 또한 모든 부재의 불연속면에서는 이끼류와 잡초가 서식하고 있는 등, 식물체에 의한 기계적 풍화를 가속시키고 있어 이에 대한 대비가 있어야 할 것이다.

4. 보존과학적 훼손도 평가

4.1. 훼손도 평가

이 석탑은 높이가 약 7.6m로 2단의 기단위에 오층의 탑신을 올린 모습이다. 기단의 네 모서리와 면의 가운데에 기둥 모양을 새겨 두었는데, 남쪽 면이 파괴되어 있어 그 안쪽으로 커다란 기둥돌이 들여다보인다. 이 탑은 이상헌과 박경립(1955)에 의하여 여주 및 양평 일대에 분포하는 석조문화재와의 연구과정에서 풍화와

훼손의 심각성이 지적된 바 있다. 암석학적으로 볼 때, 지대석부터 1층 탑신은 이 지역의 기반암과 동일한 안구상 편마암이며, 1층 옥개석부터 노반까지는 흑운모 화강암으로 구성되어 있다. 하대갑석의 일부도 흑운모 화강암이다. 기단부에 사용된 일부 화강암과 편마암은 상대적인 풍화도로 보아 최근에 보수한 것으로 판단된다. 그러나 이 흑운모 화강암의 기원지는 불분명하다. 현지조사에 의하면, 전반적인 암상의 특징으로 보아 주라기의 대보화강암으로 추정되며 여주 일대에 분포하는 암석과 가장 유사한 것으로 보인다.

이 탑의 각 부분은 크고 작은 자연적 및 인위적 훼손이 가중되어 있어 부재의 구조적 불균형과 균열 및 파괴가 발생되어 있다(Fig. 6A). 또한 균열과 박리 및 박락 현상으로 각 부재들이 뒤틀려 있으며 모서리 부분이 마모되어 있고, 이격이 아주 심하여 중앙부는 침

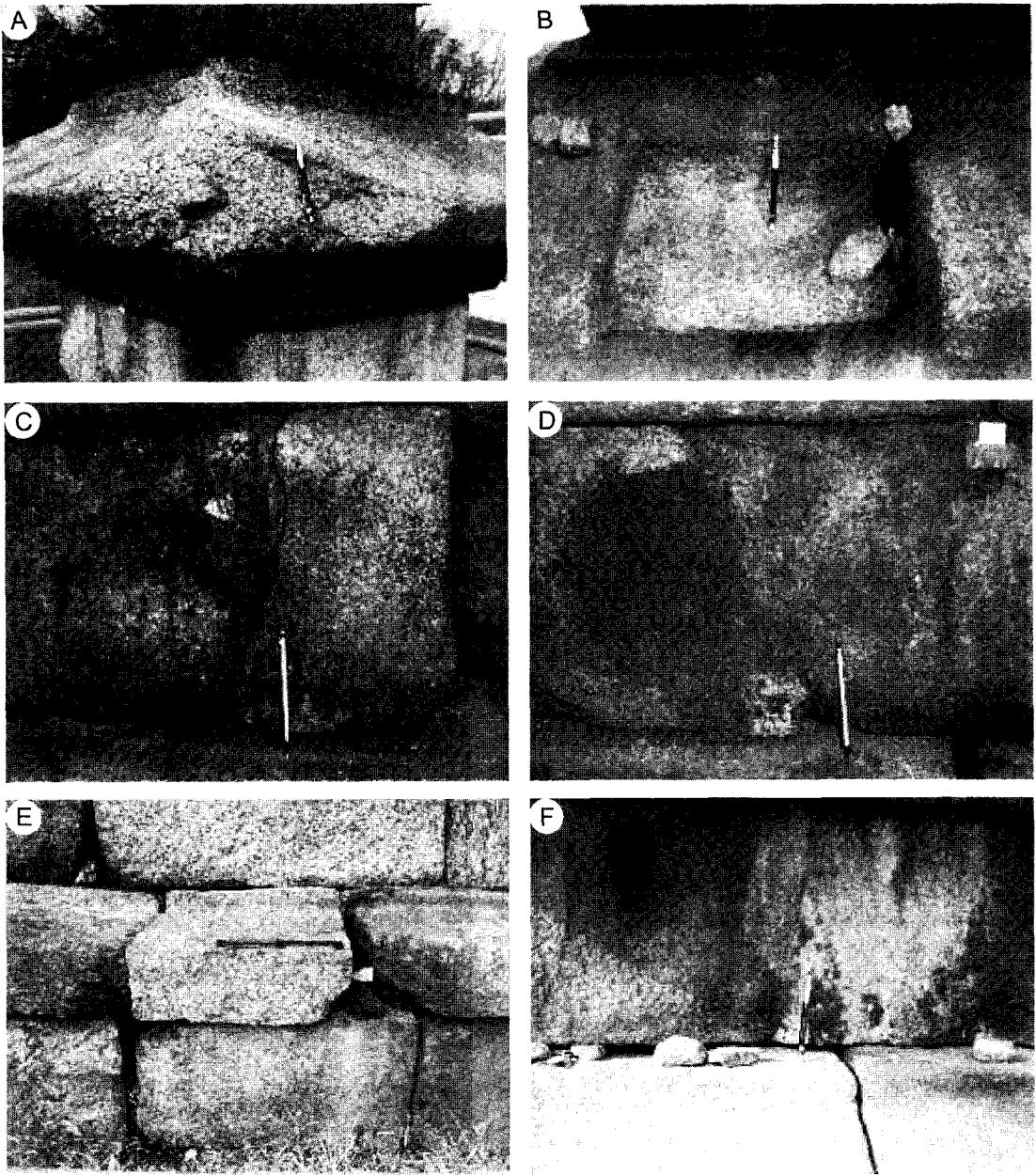


Fig. 6. Deterioration degrees showing the rock properties of the Chungung-dong 5-storied pagoda. (A) Artificial broken material of the 4th floor roof rock. (B) Dark brown discoloration and rectangular cut off material of the 3rd roof rock. (C) The 3rd floor body material divided by curved crack. (D) White grey and dark brown precipitates occurred with peeling off and exfoliations in the 3rd floor body material. (E) Twisted and disparity intervals between the each materials of the basement rocks. (F) Dark brown discoloration and white grey secondary precipitates of the 3rd body materials.

하하고 양단은 융기하여 들떠 있는 모양을 보인다(Fig. 6B, 6C). 한편 거의 모든 부재의 표면에는 회백색, 암회색, 황갈색 및 암갈색 오염물질이 피복되어 있다. 이들은 지의류 또는 이끼류의 피복과 석탑의 균형을 유지하

기 위해 삼입한 첩편의 수산화 작용이 복합적으로 작용한 것이다(Fig. 6B, 6D, 6F). 탑의 상륜부에는 완전히 소실되어 머리장식으로 노반만이 남아있는 등, 전체적으로 박락이 심하며 부재의 약 40%가 파손되어 있다.

부재간의 이격은 최소 0.1cm에서 최대 7cm에 달한다(Fig. 6B, 6F). 따라서 이 석탑은 남서쪽으로 약 0.4° 기울어져 있으며, 각 부재를 사이가 들떠 있고 서로 연결된 부분에서는 두 부재사이에 높이차가 발견된다. 특히 서측면은 하대중석과 하대갑석 사이의 이격이 심하여 하대중석을 이루는 부재들이 심하게 뒤틀려 있고(Fig. 6E), 이것의 영향으로 남측면 하대갑석과 북측면 하대갑의 부재가 들떠 있다(Fig. 6F).

전체적으로 볼 때, 이 석탑은 상부의 하중에 의해 안구상 편마암으로 이루어진 1층 탑신이하 부재들의 기계적 풍화가 심하다. 또한 1층 옥개석 상부의 부재들 중 3, 4, 5층의 탑신에서 박리현상에 의해 암석의 내부

가 들떠 있으며, 3층과 4층 옥개석의 모서리 부분은 박락이 심하다. 이 탑의 풍화와 훼손도에 대한 내용은 서만철 등(2003)의 보고서에 상세히 기록되어 있다. 이들을 요약하여 탑의 각 면에 풍화훼손도를 표현한 것이 Fig. 7이다. 각 면의 그림에서 보는 바와 같이, 이 탑의 가장 심각한 문제점은 기단부의 구조적 불균형과 뒤틀림 및 부재 사이의 비정상적인 이격이다. 따라서 이를 보강하기 위한 보존과학적 대안이 요구되며, 별도의 구체적인 연구가 필요하다.

4.2. 보존관리 방안

춘궁동 오층석탑 부재에서 표면 요철이 심한 부분은 흑운모 또는 장석(정장석, 미사장석, 퍼사이트 및 사장석)이 있던 자리로서 강수의 분해 작용에 의하여 광물 조직이 이완되고 암석의 물리적 강도도 약해져 있다. 따라서 여기에서 분비되는 무기염류가 하등식물에 양분을 공급하고 훼손된 조직의 결합은 서식장소를 제공하게 되어 고등식물로까지 천이를 일으키게 된 것이다. 겨울에는 수분의 결빙과 해동이 반복되면서 암석을 기계적으로 파괴할 것이다. 또한 주변 부지의 토양과 잡초에 있는 수분이 기단부를 따라 상승하기도 하며, 증발과정에서 잔류물을 침전시킬 것이다.

그러나 이와 같은 자연환경 요인을 차단하기는 극히 어려운 상태이다. 보호각을 지어 관리하기 이전에는 석재에 영향을 미치는 모든 수분의 유지시간을 최대한 단축시키는 것이 필요하다. 특히 파괴된 부재와 부재 사이에서는 각종 수분과 반응에 의하여 풍화도가 극에 달해있으며 침전물과 자생한 결정질 광물 및 하등생물도 번성하고 있다. 따라서 암석의 표면에는 강수가 스며드는 것을 방지하기 위한 방수처리가 필요할 것이다. 또한 예술적 가치를 훼손하지 않는 범위에서 지반의 구조적 안정을 위한 지질공학적 보강과, 균열대의 보수가 시급한 실정이다.

더욱 중요한 문제는 현재 본체의 안정도를 좌우하고 있는 지반에 대한 지질공학적 보강이 필요하다는 것이다. 보강방법에는 토압과 암압을 지탱해줄 수 있는 연약지반 개량공법이 동원되어야 할 것이다. 한편 기단부에 충전된 토양과 식생을 제거한 뒤 자갈로 채워 넣어야 한다. 이는 하등식물에서 고등식물로 천이하는 생태계의 변화에서 석탑의 생물학적 훼손을 줄여줄 것으로 예측된다. 이 오층석탑에 나타난 이차적 오염현황은 황갈색 수산화철에 의한 암석의 변색과 강수의 유동흔적을 따라 나타나는 암회색 침전물, 지의류에 의한 오염 등이다. 이들은 먼저 증류수에 의한 세척이

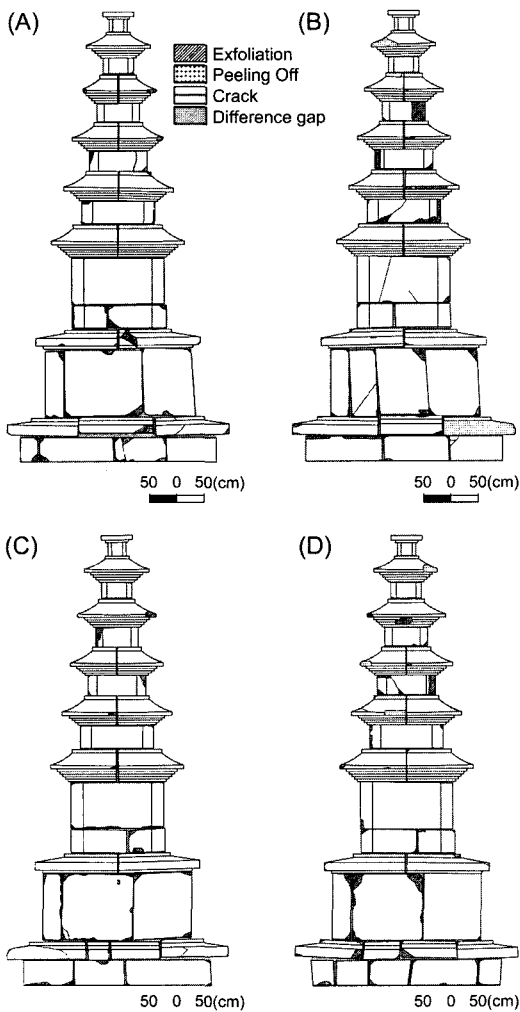


Fig. 7. Detailed deterioration sketch map showing eastern (A), southern (B), western (C) and northern (D) views of the Chungung-dong 5-storied pagoda.

필요한 부분이다. 또한 먼지와 오염물질 및 침전물은 정기적인 세척이 필요하다.

석조문화재의 열극에 대한 보존처리에는 외관을 훼손하지 않도록 충전체와 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(Lee *et al.*, 2003). 장기간 대기에 노출되어 있는 석조문화재는 물리화학적 및 생물학적 풍화가 진행되어 균열이 생기고 박락되어 미세한 먼지 입자와 꽃가루가 암석 내에 침투되어 있어서 제거하기가 힘들다. 일반적인 세척은 물리적 또는 화학적 방법 외에 고압의 물을 뿌리거나 스팀을 사용하여 오염물을 제거하는 방법이 있다. 석조경화제의 선정은 기본성분 및 현재까지 문화재에 사용된 신뢰성을 고려하여 결정하며, 보존처리를 위한 합성수지는 암석의 풍화원인 및 부식 메커니즘 등 현장여건을 고려하여 선택하여야 한다.

5. 결 언

1. 춘궁동 오층석탑의 지대석과 1층 탑신을 구성하는 암석은 이 지역의 기반암과 동일한 안구상 편마암이다. 1층 옥개석부터 노반까지는 흑운모 화강암이며, 하대갑석의 일부도 흑운모 화강암이다. 그러나 상대적 풍화도로 보아 기반부의 일부는 최근에 교체한 것으로 판단된다.

2. 이 탑은 전면이 N30°W를 향하고 있으며, 전체적으로 암갈색 오염물질로 피복되어 있고, 박락이 심하여 부재의 약 40%가 파손되어 있다. 또한 각 부재들의 모서리 부분이 파괴되어 있고, 이격이 아주 심하며 중앙부는 침하하고 양단은 들떠 있는 모양을 보인다. 부재간의 이격은 최소 0.1cm에서 최대 7cm에 달한다.

3. 이 탑의 부재인 안구상 편마암과 흑운모 화강암의 주요 조암광물은 거의 동일하게 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 녹니석 등이다. 또한 두 암석의 조암광물인 장석은 풍화에 의해 할로사이트로 흑운모는 녹니석으로 변질되어 있다.

4. 장석과 흑운모의 입자경계에서는 지의류가 성장하고 있으며, 보통 1~3 μm 정도의 두께를 갖는 포자근과 균사체가 표면에서 3cm 깊이의 암석내부에 있는 조암광물까지 영향을 주었다. 이런 곳은 약한 충격에도 암편이 쉽게 떨어져 나온다.

5. 보존과학적 관점으로 볼 때, 이 탑은 오염물질의

제거와 박락과 밀실된 부위에 대한 보강과 보존처리가 필요하다. 보존처리에는 세정, 오염물 제거, 접합 및 고색에까지 완전한 계획을 세워 추진해야 할 것이다.

6. 이격이 심한 석재와 석재 사이는 암석용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 할 것으로 보이며, 석탑 본체에 미치는 지면의 습도를 저감하기 위한 방안도 고려되어야 할 것이다. 또한 식물상의 오염과 천이를 차단하기 위해서는 부지를 정비하고 자갈을 피복하는 방안을 검토해야 할 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 지원된 공주대학교 문화재비파괴진단연구실의 연구비로 완성되었음을 명기하며 이에 감사한다. 또한 필자들의 줄고에 관심을 가져주시고 원고의 부족한 점에 대하여 상세한 지적과 건설적인 비평을 가해주시신 안동대학교 황상구 교수님과 부산대학교 김진섭 교수님께도 깊이 감사한다.

참고문헌

김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 에폭시수지 개발 시험연구. 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20권, p. 139-155.
 문화재청 (2003) 문화재 상세정보, 광주 춘궁리 오층석탑. <http://www.ocp.go.kr>
 서만철, 이찬희, 채상정, 류제라, 한정식, 변성환, 이효민, 정연삼 (2003) 하남시 춘궁동 5층석탑의 비파괴조사 및 암석학적 연구. 공주대학교 문화재보존과학연구소, 82p.
 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희 (1999) 석조문화재 발수경화제 시험연구(I). 국립문화재연구소, 보존과학연구, 20권, p. 155-173.
 원종관, 백광호, 지정만, 구무옥, 안해룡 (1981) 한국지질도 특성 도록 및 설명서(1:50,000). 한국동력자원연구소, 33p.
 이상현 (1998) 국내 석조문화재의 보전대책 수립을 위한 지질학적 고찰. 보존과학회지, 7권, p. 9-18.
 이상현, 박경립 (1995) 석조문화재의 특징과 암석에 대한 지질학적 연구(III). 보존과학회지, 4권, p. 11-42.
 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.
 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운 (2000) 경주 불국사와 석굴

- 암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여. 지질학회지, 36권, p. 335-340.
- 최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희 (1999) 충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책. 충청남도, 조사연구보고서, 425p.
- 최석원, 이찬희 (2000) 부여 대조사 화강암 미록보살입상의 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.
- Brooks, R.R. (1972) Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration. Harper and Row, New York, 290p.
- 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.
- 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. Geochem. 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.

2003년 10월 27일 원고접수, 2004년 2월 11일 게재승인.