

옥천 용암사 마애불의 거동특성 해석과 이차적 훼손

이찬희* | 정연삼** | 김지영* | 이정은*

*공주대학교 문화재보존학과

**공주대학교 지질환경학과

Behavior Interpretation and Secondary Degradation of the Standing Sculptured Buddha at the Yongamsa Temple, Ogcheon, Korea

Chan Hee Lee* | Youn Sam Chung** | Ji Young Kim* | Jeong Eun Yi*

*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

**Department of Geoenvironment Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

초록 용암사 마애불의 구성재질은 기계적 및 화학적 풍화작용을 받은 반상흑운모화강암이다. 이 마애불의 모암과 주변의 기반암에는 수직에 가까운 경사와 N8°E의 주향을 갖는 불연속면이 산재한다. 또한 다른 절리계와 이를 사교하는 절리계가 발달되어 있어 암반의 구조적 불안정을 초래하고 있다. 이 암반의 토압과 편압력은 마애불 전신으로 향해있으며, 암반상부에서는 불연속면의 이격을 따라 전도파괴, 평면파괴 및 쉼기파괴의 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 마애불의 구조적 안정을 위한 지반공학적 보강방법이 강구되어야 할 것이다. 한편 마애불이 선각된 암반 사면의 표면과 공극에는 무기물 및 지의류와 선태류의 오염이 심각하며, 절리대는 토양화의 진행에 의하여 잡초와 수근이 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있다. 이와 같은 이차적 훼손과 불연속면에 서식하는 식생을 제거하기 위한 생화학적 처리도 필요하다.

ABSTRACT Host rock of the standing sculptured Buddha in the Yongamsa temple is macular porphyritic biotite granite, which has gone through mechanical and chemical weathering. The rock around the Buddha statue is busily scattered with steep inclinations that are almost vertically discontinuous planes with the strikes of N8°E. Especially the development of the joints that cross the major joints causes the structural instability of the rock. The rock of the Buddha statue is separated into several rock blocks because of many different discontinuity. Thus it is estimated that the bed rock has not only plane and toppling failure but also wedge failure in all the sides. Since the differential pressure is imposed on the body of the Buddha in the host rock, it is urgent to give a reinforce treatment of geotechnical engineering for the safe of its structural stability. Very contact area of joints have turned into soil, which promotes the growth of weeds and plant roots, then aggravates the mechanical weathering of the rock. Thus conservational treatments should also be considered to get rid of secondary contaminants and vegetation along the discontinuities and to prevent further damages.

1. 서론

용암사 마애불은 충북 옥천군 옥천읍 삼청리 용암사에 있으며 시도유형문화재 제17호로 지정된 석조문화재이다. 이 연구에서는 용암사 마애불의 암석학적, 생물학적 및 물리적 산출상태를 상세히 분석하였고 이를 토대로 보존과학적 관리방안을 검토하였다. 이 마애불은 용암사 경내 산기슭의 동측 절벽에 양각되어 있다. 우리나라 대부분의 석조문화재가 화강암이나 화강편마암으로 이루어져 있듯이 이 마애불상의 재질도 반상 흑운모 화강암이다. 그러나 이 마애불이 조각된 암반은 여러 개의 암괴로 분리되어 있고 암반 주변의 크고 작은 균열대에는 지의류, 선대류, 양치류와 초본 및 목본식물이 서식하고 있어 지질학적, 물리학적, 화학적 및 생물학적 풍화의 민감한 환경에 노출되어 있다.

석조문화재를 구성하는 일반적인 암석의 풍화와 물성 변화에 대하여는 이미 포괄적으로 논의되어 있다.^{1,2,3,4} 또한 이 과정에서 생성된 무기산과 공극은 조류, 선대류, 지의류 또는 고등식물의 서식처를 제공하게 되고 이들의 성장에 따라 기계적 풍화작용은 가속화되게 마련이다. 이에 관한 종합적인 현상도 보고 된 바 있다.^{5,6} 한편 국내에 분포하는 석조문화재의 재질 및 보존과학적 연구는 아직 초기단계이나 비교적 활발히 연구되고 있다.^{7,8,9,10,11,12,13,14}

용암사 마애불은 거의 수직의 암벽에 선각되어 있으며 이 마애불의 암벽에는 크고 작은 불연속면이 무질서하게 발달되어 있다. 또한 마애불 상단의 평탄한 암반에는 구열상으로 심하게 벌어져 빗물의 수로가 되며, 틈사이로 흘러들어가던 빗물은 암벽의 전면에서 새겨진 마애불에게 영향을 미치고 있다. 따라서 이 마애불에 인접한 수직 및 수평 균열대는 강회로 충전한 흔적이 나타나 있다. 그러나 이에 대한 어떤 보수기록도 남아있지 않으며, 정량적인 보존과학적 진단 및 연구가 수행되지 않은 상태이다.

이 연구에서는 용암사 마애불을 대상으로 석조문화재의 암석학적 특성과 기계적, 화학적, 광물학적 및 생물학적 풍화상태를 진단하였다. 특히 이 마애불은 암반의 사면에 선각된 문화재로서 사면의 노출상태에 대한 주향과 경사를 측정하였고 불연속면의 방향성을 구하여 사면의 거동특성과 구조적 안정성을 해석하였다. 또한 표면에

발생된 무기물 및 유기물의 오염도 분석과 주변 환경변화에 따른 영향을 규명하여 이 마애불의 보존과학적 문제점과 관리방안을 제시하고자 한다. 이 결과는 정량화를 통해 석조문화재의 체계적인 보존연구를 위한 자료로 활용될 것이다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

용암사 마애불은 감실형으로 바위를 파서 도드라지게 새긴 얇은 부조의 마애불 입상으로 붉은 바위색이 아주 인상적이다. 또한 마애불의 전면은 붉은색으로 채색되어 있고 좌우에는 암흑색의 오염물질이 분포한다. 우측에는 수직균열과 이를 충전한 강회가 노출되어 있다. 마애불의 총 높이는 343 cm, 두상은 52 cm, 가슴너비는 83 cm이다. 발을 좌우로 벌리면서 연꽃 대좌 위에서 서 있는 이 불상은 신라말 고려초의 마애불에 유행하던 수법이 잘 표현되어 있다.

이 불상은 가늘고 긴 눈, 작은 입, 가는 코등이 묘사되어 얼굴의 파격적인 미소에도 불구하고 도식적인 특징을 보여준다. 이와 같은 특징은 넓은 어깨, 늘씬한 하체 같은 신체의 표현에도 불구하고, 갖다 붙인 듯한 팔과 V형의 규칙적인 옷 주름, 좌우로 힘없이 표현된 옷자락 등 세부적인 표현에서도 나타난다(Fig. 1). 따라서 세련된 신라조각이 점차 형식화해가던 시대의 불상으로 생각되며, 신라의 마지막 태자인 마의태자가 조성했다는 전설과도 부합되어 의미 있는 마애불로 평가된다.¹⁵



Fig. 1. Frontal view of the standing sculptured Buddha statue at the Yongamsa temple.

2.2. 연구방법

이 마애불은 기상변화 및 대기로부터 침해를 받기 쉬운 야외의 절벽에 노출되어 있다. 따라서 암석구성 성분의 용해, 표면의 박리박락, 기반암 및 주변암의 균열, 생물천이로 인한 풍화 등으로 심하게 훼손되었다. 이 연구에서는 마애불 주변에 대한 지형 및 지질조사와 마애불의 물리적, 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사 및 구조적 안정성 해석을 실시하였다. 이를 위해 마애불과 마애불 주변 기반암을 대상으로 대자율과 선구조를 측정하였고, 실내연구를 위하여 마애불 주변에 분포하며 석불과 동일한 종의 암편을 채취하여 암석학적 및 광물학적 분석용 시료로 이용하였다.

시료채취는 육안관찰에 따른 암상과 풍화등급으로 비교적 풍화가 되지 않은 유형과 풍화가 심하게 진행된 것으로 구분하였다. 이 암석의 주성분 원소 화학분석은 X-선 형광분석기(XRF)를 이용하였으며 분석기기는 RIX 2100 모델이었다. 대자율 측정은 10^{-5} SI 단위의 측정 한계를 가진 KT-6 (Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하여 측정하였고, 대자율의 크기는 10^{-3} SI 단위를 사용하였다. 암석의 광물조성을 분석하기 위해 X-선 회절분석을 실시하였는데, 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIb이고, X-선은 CuK α 에 조건은 30kV와 150mA이다.

이 마애불을 구성하는 암석의 조암광물에 관한 조성비와 광물종, 풍화에 따른 광물 및 생물학적 관찰을 위하여 주사전자현미경 분석을 실시하였으며, 모델은 LINK사의 에너지 분산형 X-선 분석기(EDXA, PV 9100/60)가 장착된 Shimadzu사의 ISI-SX-40이다. 분석용 시료는 탄소와 금으로 이중 피복한 것을 사용하였다. 이 마애불의 모암에 대한 정량적인 광물조성, 광물학적 공생관계, 조직과 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 규명하기 위하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 기기는 자동계수기가 장착된 Nikon사의 모델 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다. 또한 마애불의 기반암에 발달한 절리면의 구조적 안정성을 진단하고자 주향과 경사를 측정하고 DIPS 프로그램을 이용하여 평사투영도(stereo net)와 로즈다이어그램(rose diagram)에 투영하여 거동특성을 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지형 및 암석분포

소백산맥이 태백산맥에서 갈라져 나와 남서로 발달하며 속리산을 기점으로 남으로 방향을 바꾸는데, 옥천지역은 바로 이 속리산을 남으로 연결하는 두 소형 산계에 의해 둘러싸여 분지지형을 이룬다. 옥천분지를 이루는 두 지류 중 남서쪽을 형성하고 있는 것이 능봉-마성산-도덕봉 지맥이다. 이 산릉은 석영반암의 고지형을 형성하며 대부분 산정에서 가파른 절벽을 이루고 있다. 용암사 마애불은 마성산이 남동쪽으로 연장된 능선의 북동사면에 위치하고 있으며 북서방향과 남동방향에는 각각 작은 계곡이 형성되어 약간 돌출된 지형을 이루고 있다.

용암사 마애불이 위치한 산사면이 바라보고 있는 북동쪽은 옥천화강암 지역으로, 심한 풍화작용으로 인하여 낮은 구릉을 형성한다. 이 지역의 하계는 북쪽의 대청호와 연결되는 금강이 옥천읍의 북쪽과 동쪽을 감싸고, 남으로는 금천천이 능봉-마성산의 남서쪽 자락 끝을 경유하여 흐른다. 용암사 북동쪽 저지의 평야지역에는 여러 개의 저수지가 형성되어 있는데, 용암사 입구로 들어가는 삼청리 부근에 삼청저수지와 소정저수지가 있다.

이 지역을 구성하고 있는 암석은 석영반암과 옥천화강암으로 옥천화강암이 중앙부에 넓게 분포하고 이것의 남서부와 남동부에는 반상흑운모화강암과 이를 관입한 석영반암이 분포된다.¹⁶ 옥천화강암은 중립질 흑운모 화강암으로 염기성암의 포획암이 부분적으로 발달하며 용암사 마애불이 위치한 삼청리와 세산리 등에서는 수십 cm의 크기를 이루기도 한다. 이들은 대부분 유색광물과 사장석으로 구성된 섬록암질암을 이룬다. 암색은 회색내지 담회색, 부분적으로 옅은 담홍색을 띤다.¹⁶ 용암사 마애불이 위치한 지역은 능봉-마성산 산릉을 이루는 석영반암 지역에 포함되나 마애불 기반암의 암종은 위의 반상 흑운모화강암으로 판단된다.

3.2. 마애불의 산출상태

용암사 마애불은 동쪽을 향하고 있는 절벽의 하단부에 양각되어 있다(Fig. 2A). 이 마애불은 세련된 신라의 조각이 점차 형식화되어 가던 시대에 조성된 것으로 추

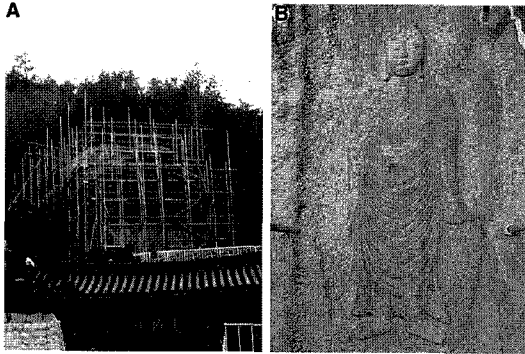


Fig. 2. (A) Host rock engraved Buddha statue set up the scaffold by stainless steel pipes and plates for detail survey and conservation treatments. (B) The Buddha statue of the Yongamsa temple is partly painted in reddish brown pigments.

정되고 있다. 마애불이 새겨진 암석 표면에는 주철한 흔적으로 보이는 붉은 색채가 특색 있다(Fig. 2B). 마애불 주변에는 인위적인 보호시설은 설치되어 있지 않으나 현재 보존처리를 위하여 가시시설이 설치된 상태이다. 마애불 상부에는 자연암반이 돌출되어 지붕역할을 함으로써 비와 바람으로부터 마애불을 보호하고 있다. 그러나 이 암반은 수직, 수평 절리가 발달하여 여러 암괴로 분리되어 있어 모암으로부터 이탈되어 붕괴될 위험이 있는 것으로 판단된다.

마애불이 조각된 암반 주변에는 크고 작은 균열이 발생되어 있는데, 이 틈으로는 과거에 강회를 충전했던 것으로 보이는 보수 흔적이 남아있다. 마애불 상부에는 빗물이 흘러내린 흔적을 따라 암회색의 산화물이 넓은 부위에 걸쳐 관찰된다. 이 마애불은 영험하다 하여 과거부터 끊임없이 민간에서 신성한 예배대상으로 여겨져 왔다. 이로 인해 마애불이 양각된 암반 하단에는 사람들이 예배를 위해 초를 연소하여 발생한 그을음이 마애불 주변을 오염시키고 있다. 마애불 좌우측의 암반에도 수많은 수직절리가 발달하였는데 균열된 틈으로 초본 또는 목본식물의 천이가 이미 상당히 진행된 상태이며 성장한 수목들의 뿌리가 암석의 기계적 풍화를 더욱 가속시키고 있다.

3.3. 재질특성

연구지역에 분포하는 옥천화강암은 반상 흑운모 화강암으로 염기성 포획암이 발달하였고 이들은 대부분 심륙

암질 포획암으로 구성되며 수십 cm의 타원형을 이루기도 한다. 암색은 회색 내지 담회색에 부분적으로 옅은 담홍색을 띤다. 주요 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모와 녹니석 등이다. 마애불을 구성하는 암석은 중립질의 반정을 갖는 반상 흑운모 화강암이다(Fig. 3A, 3B). 양각된 표면에는 원형 또는 타원형의 염기성 포획암이 일부 관찰된다. 이 주변은 흑운모 화강암에 비해 풍화에 약하기 때문에 주변보다 깊게 패인 차별 침식면을 보인다(Fig. 3C). 마애불의 표면은 보통 화강암에서와 유사하게 박리와 박락으로 인해 일부 주철이 떨어져 나가 불균일한 풍화면을 보이고 있다.

이 암석의 구성광물을 동정하기 위해 마애불과 같은 암종의 편을 박편으로 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 현미경하에서는 현정질의 장석이 보이는 반상흑운모 화강암이다(Fig. 3D). 석영은 세리사이트 조직을 보이고 있으며, 흑운모는 풍화작용에 따라 녹니석화되어 있는 모습이 관찰된다(Fig. 3E). 등립질의 사장석 결정은 반자형으로 주로 알바이트 및 칼스바드 쌍정을 이루고 있다(Fig. 3F). 이 마애불을 이루는 암석과 마애불 균열대를 충전했던 강회를 분말화하여 X-선 회절분석을 실시한 결과, 마애불 구성암석(YM-1, YM-2)의 주요 조암광물로 석영, 정장석, 사장석과 드물게 스�멕타이트 및 각섬석이 검출되었다. 또한 강회(YMG-1)에서는 석영, 정장석, 사장석 및 스�멕타이트와 방해석 등이 동정되었다(Fig. 4).

전암 대자율은 암석이 자화될 수 있는 정도를 나타내는 지수로서 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단이다. 지구의 자기장에 의해 자화된 암석들은 각각 독특한 대자율 값을 가진다. 이 값은 진공에서 0이며, 일반적인 화강암의 평균 대자율은 $2.512(\times 10^{-3})$ SI unit이다. 이 대자율은 암석에 함유된 불투명 광물이며 강자성을 나타내는 자철석의 함량과 정적 상관관계를 가진다. 따라서 대자율을 통해 자철석을 함유한 암석의 광역적 분포를 파악할 수 있기 때문에 1.256을 기준으로 이보다 높은 경우는 자철석 계열로, 낮은 경우는 티탄철석 계열의 암석으로 구분한다.¹⁷⁾

대자율의 측정은 10^{-5} SI 단위의 측정한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하였고, 대자율의 세기는 SI 단위계로 표기하였다. 측정은 기반암에서 마애불과 마애불 주변 암반을 대상으로 하였다

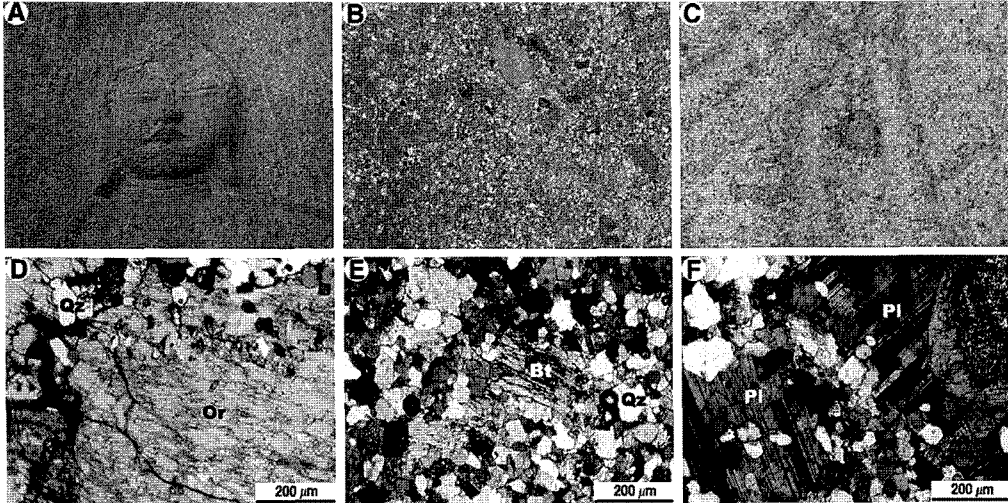


Fig. 3. Host rock of the Buddha statue and microphotographs of host rocks. (A, B) Lithology of the Buddha statue is medium-grained biotite granite with partly porphyritic texture. (C) Highly weathered host rock is included a basic xenolith and shows reddish brown color due to painting. (D, E) Porphyritic granite is composed of orthoclase phenocryst and seriate textured quartz. (F) Plagioclase is altered with clay minerals along the grain boundaries. Or: orthoclase, Qz: quartz, Bt: biotite, Pl: plagioclase.

(Fig. 5). 측정된 결과, 마애불이 양각된 부분은 $2.14 \sim 4.64 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 범위 내에서 대자를 값이 분포하며 평균 $3.43 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 값을 가진다. 마애불 주변 암반 역시 이와 비슷한 $2.28 \sim 3.76 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 범위 내의 값을 갖으며 평균은 $2.99 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이다. 이 같은 사실로 볼 때, 용암사 마애불을 구성

하는 암석은 자철석계열의 반상 혹은도 화강암임을 알 수 있다.

3.4. 불연속면의 거동특성

암석의 기계적 풍화작용이란 물리적인 변화에 의하여

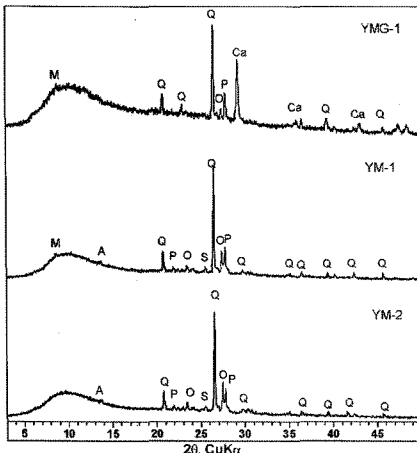


Fig. 4. X-ray powder diffraction pattern showing the host rocks of the Buddha statue. M: mica A: amphibole Q: quartz P: plagioclase O: orthoclase Ca: calcite.

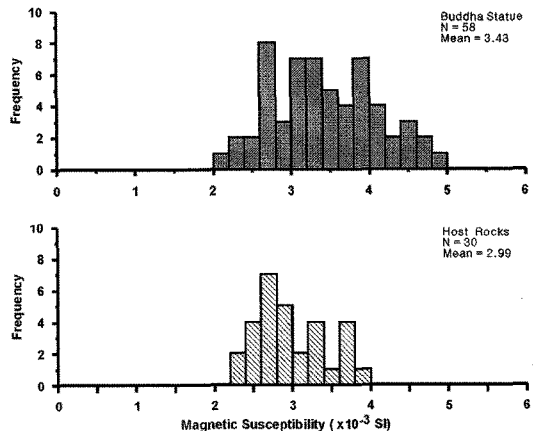


Fig. 5. Diagrams showing the whole rock magnetic susceptibility of the Buddha statue (upper) and host rocks (lower).

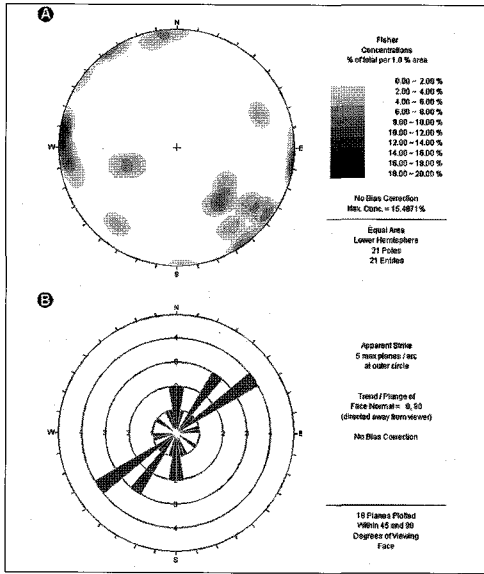


Fig. 6. Plotted on stereo-net (A) and rose diagram (B) for the discontinuity systems of the Buddha statue.

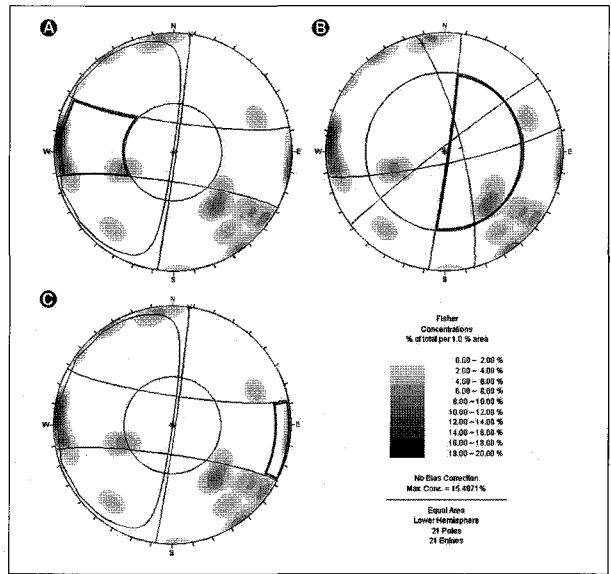


Fig. 7. Diagrams showing behavior of discontinuity systems for the Buddha statue. Thick lines and circles are faced fields of possible for plane(A), wedge(B) and toppling(C) failures, respectively.

암석의 입자 경계나 공극과 같은 불연속면을 따라 광물이 잘게 파괴되는 분해현상을 말한다. 이 같은 현상은 암석이 생성될 당시의 압력과 대기압과의 차이로 인한 압력감소, 암석의 물성강도, 암석 공극 내 수분의 결빙 및 응해작용 때문에 발생한다. 이렇게 암석 내에 열극이 형성되면 이후 반복되는 기계적 풍화작용이 박리와 박락을 일으키고 절리 또는 단층으로 발전시켜 암석의 구조적 안정성에 심각한 위협을 주게 되는 것이다.

불연속면의 존재유무는 암반사면의 안정도에 매우 중요한 영향을 미치며, 이러한 지질학적 특징들을 알아내는 것은 안정성 연구의 가장 중요한 부분이다. 마애불의 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 Windows용 프로그램인 DIPS로 평사투영법에 의한 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴 가능성을 검토하였다(Fig. 6). 우선 이 마애불 및 마애불 주변의 암반에서 측정해 온 불연속면의 주향과 경사를 구면에 투영하여 비교하면, 불연속면의 분포가 전체 구면에 골고루 분포되어 나타남을 볼 수 있었다.

사면의 평면파괴는 중력의 작용에 의해 암괴가 평면 활동을 일으키는 경우 단일면상의 암괴는 취약면의 경사방향에 평행하게 이동하는 것이다. 암반사면에서 비교적 드물게 발생하는 것으로서, 질서정연한 지질구조

를 가지는 암반에서의 파괴유형으로 파괴면의 경사각이 사면의 경사각보다 더 작아야하고 그 파괴면의 마찰각보다 더 커야 한다. 쉐기파괴는 두 불연속면이 경사면을 비스듬히 사교하여 존재하고 그 교선이 경사면에 드러나 있을 때, 이 교선의 경사가 마찰각보다 클 경우 이들 불연속면 위에 놓여 있는 쉐기형 암반은 교선을 따라 아래로 미끄러지는 파괴유형이다. 전도파괴는 암주나 암석 블록들이 고정된 어떤 기준점에 대해 회전하며 파괴되는 현상이다.

용암사 마애불에 나타난 절리들의 방향을 살펴보면, 마애불이 선각된 부분의 주향과 경사는 각각 N8° E, 88° SE로써 거의 수직에 가까웠으며 북사면에 선각되었음을 보여준다. 마애불 및 마애불이 선각된 암반의 절리대의 방향은 N4~52° W와 N6~88° E로 다양하다. 경사는 42~89° 까지 구조적으로 불안정한 모습을 보이고 있다. 주요 절리는 N56° E~70° NW, N18° W~42° NE, N88° E~88° SE의 주향과 경사를 갖는다(Fig. 6). 이번 DIPS에 사용된 마찰각은 Rock Slope Engineering에서 사용하는 화강암 기본마찰각의 값인 33° 를 적용하였다.

경사면(slope surface)을 평사투영도에 대원으로 작도한 후, 대원을 이루고 있는 각 점들에 대하여 극

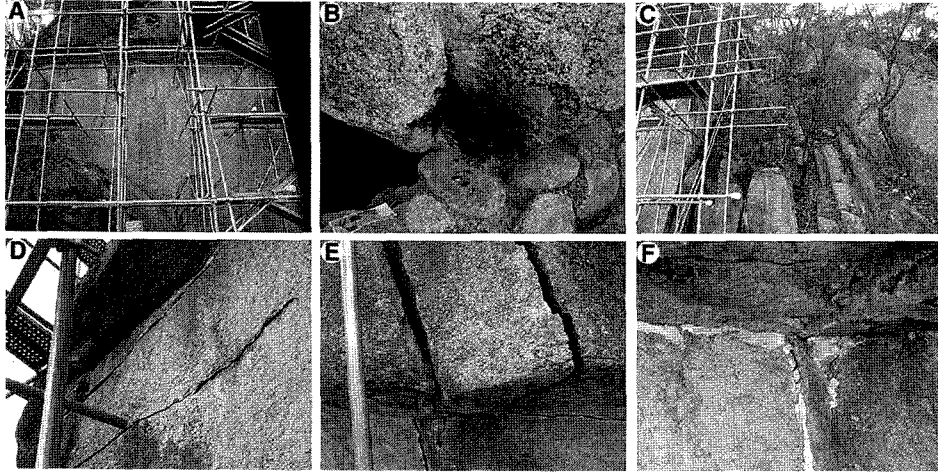


Fig. 8. Deterioration and physical weathering showing the host rocks of the Buddha statue. (A) Frontal view of the Buddha statue between stainless steel pipes and plates. (B) Dark brown contaminants by human activities. (C) A lot of plants and trees are growing around the Buddha statue. (D) Host rock of the Buddha statue is developed into various vertical and horizontal joint systems. (E) Protrude roof style rock of the Buddha statue divided by oblique joint set. (F) Gap to the host rock jammed quick lime into the fractures for temporary water control.

(pole)을 연속적으로 작도할 경우 사면의 주향에 접하는 타원을 도식할 수 있다. 이 타원을 daylight envelope이라 하는데 일반적으로 타원이지만 사면이 수직인 경우 (Fig. 7A)는 타원형으로서 뚜렷이 도식되지 않는다. 이렇게 도식된 daylight envelope 내에 포함되는 불연속면들은 불연속면의 경사각이 불연속면의 마찰각 보다 큰 경우는 불안정하여 아래에 설명할 평면파괴가 발생하고, 마찰각 보다 작은 경우에는 안정하다. 앞에도 언급하였듯이 이 연구에서는 실내실험을 통한 마찰계수를 계산하지 않았으므로 일반적인 화강암의 마찰계수인 33° 를 이용하였다.

Fig. 7A는 평면파괴를 도식한 것으로 마찰각보다는 크고 사면의 경사각보다는 작은 위치는 초승달 모양의 영역이 되는데, 이 영역 중 사면의 주향과 $\pm 20^\circ$ 되는 좁은 선 영역이 파괴가 가능한 장소이다. 이 안에 도식되는 불연속면이 최소 12%이다. 따라서 이 마애불의 사면은 평면파괴의 가능성이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 7B는 썩기파괴를 도식한 것으로, 사면의 경사각보다는 작고 마찰각보다는 큰 길쭉한 초승달모양의 영역이 파괴가 일어날 수 있는 영역이다. 이 영역 안에 불연속면이 교차할 때 썩기파괴의 가능성이 있다. 이 암반에는 두 방향의 절리군 중에 $N10\sim 22^\circ W$ 의 주향을

갖는 불연속면들이 $N60\sim 80^\circ E$ 의 주향을 갖는 불연속면과 파괴영역 안에서 교차함으로써 썩기파괴의 가능성도 있는 것으로 해석된다.

Fig. 7C는 전도파괴를 도식한 것으로서, 잘 발달된 급경사의 불연속면으로 분리되어 있는 연속적인 암주들이 전방으로 구부러짐에 따라 사면의 방향과 평행하게 굴곡되어 붕괴될 가능성이 있는 영역이다. 이 영역에는 불연속면 군이 12% 정도 존재하므로 전도파괴의 가능성도 존재하는 것으로 판단된다. 이를 정리하면 마애불의 조각되어 있는 암반사면에는 평면파괴와 전도파괴뿐 아니라 썩기파괴의 가능성까지 가지고 있어 구조적으로 불안정한 사면에 노출되어 있는 것으로 해석할 수 있다.

3.5. 이차적 훼손

마애불이 양각된 암반은 지표면으로부터 수직한 절리의 발달로 인하여 여러 개의 암괴로 분리되어 있으며, 마애불의 하단부는 인위적인 암흑색의 오염물질이 산재한다(Fig. 8A, 8B). 절리대에는 잡목과 암편들이 산재하며 이들이 우수의 통로가 되어 이차적으로 마애불 표면의 풍화를 초래하고, 겨울에는 결빙과 융해가 반복되면서 암석의 물리적 또는 기계적 파괴를 가속시킬 것이다

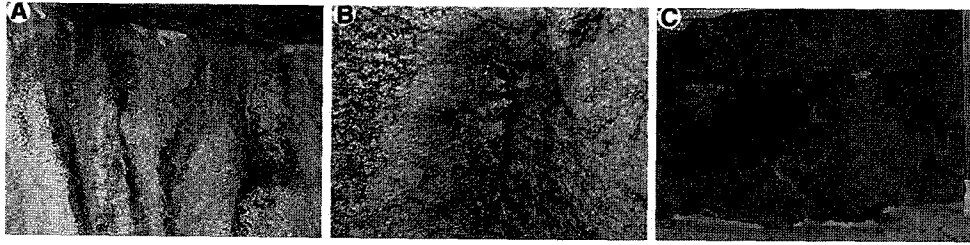


Fig. 9. Secondary contamination showing the host surface of the Buddha statue. (A, B) Dark brown contaminants covered host rock along the water pathway. (C) Yellowish brown precipitates coated with iron hydroxides.

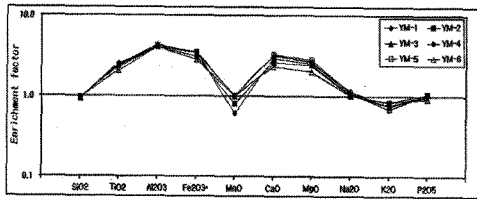


Fig. 10. Diagram showing normalized major element patterns by standard granite composition for host rocks of the Buddha statue.

(Fig. 8C). 마애불의 좌측에는 마애불 방향으로 수평균열이 발달하고 있다(Fig. 8D). 마애불에 인접한 곳에는 수직절리가 지표에서부터 상부의 돌출된 자연암반까지 연장되어 암괴의 분리, 이탈 및 붕괴 위험으로 마애불의 구조적 안정성을 위협할 것으로 보인다(Fig. 8E). 또한 마애불 주변으로 발달한 절리면 사이를 충전했던 강회는 오랜 시간이 경과함에 따라 노화되어 암석의 이차적 풍화 및 훼손을 야기하고 있다(Fig. 8F).

마애불이 선각된 기반암에는 이차적인 풍화산물에 의한 오염물이 피복 되어있다(Fig. 9). 이를 면밀히 검토하여 보면 마애불 기반암과 균열대가 강수의 유동흔적에 따라 흑색 또는 백색의 침전물에 의해 변색되어 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 9A, 9B). 보수를 위해 강회를 충전했던 부분에서 흐르는 이차적 풍화산물에 의해 변색되어 있는 균열 부위 및 강수에 의해 강회가 흘러 이차 피복된 기반암의 모습을 관찰 할 수 있다(Fig. 9C). 흑색 침전물은 망간수산화물일 것으로 백색 침전물은 방해석이나 석고로 판단된다.

이 마애불 주변에 탈락되어 있는 암석 중에 마애불과 동일한 암종을 선택하여 주성분 원소를 분석하였다. 일반적으로 풍화환경에서 원소의 상대적인 거동을 표현하기 위해 흔히 Al_2O_3 , TiO_2 및 Fe_2O_3 중에 하나를 고정성

분으로 사용한다.¹⁸ 그러나 이 마애불을 구성하는 암석의 풍화단면에는 다량의 점토광물이나 산화철 광물들이 생성되어 있으므로 이들을 고정성분으로 풍화에 의한 원소의 거동을 설명하기는 어려울 것으로 판단된다. 마애불 구성암석의 주성분 원소 분석결과는 Table 1과 같다.

주성분원소 분석을 통해 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.^{19,20} 일반적으로 풍화지수는 유동성이 작은 Al_2O_3 에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 것으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 의미한다. 풍화잠재지수는 0을 기준으로 양의 값을 보이면 화학적 풍화작용에 민감하다는 것을 지시한다. 용암사 마애불 암석의 CIA는 51.41~52.82 으로서, 전체적으로 마애불을 구성하는 암석의 풍화작용이 이미 활발하게 진행되고 있는 것으로

Table 1. Major element contents (wt. %) of host rocks for the Buddha statue at the Yongamsa temple

No.	YM-1	YM-2	YM-3	YM-4	YM-5	YM-6
SiO ₂	69.46	70.37	68.79	70.37	69.97	70.67
TiO ₂	0.50	0.47	0.49	0.46	0.48	0.41
Al ₂ O ₃	15.18	15.19	16.00	15.01	15.71	15.24
Fe ₂ O ₃ *	2.66	2.41	2.67	2.74	2.72	2.17
MnO	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05
CaO	2.26	1.86	2.33	2.10	2.35	1.68
MgO	0.69	0.62	0.67	0.64	0.73	0.52
Na ₂ O	3.71	3.59	4.00	3.64	3.90	3.57
K ₂ O	3.82	4.24	3.76	3.92	3.47	4.33
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.15	0.14	0.15	0.13
LOI	0.88	0.66	0.70	0.68	0.78	0.79
Total	99.35	99.60	99.61	99.73	100.31	99.56
CIA ¹⁾	51.41	52.26	51.80	51.65	52.10	52.82

Fe₂O₃*: as total FeO, LOI: loss-on-ignition, CIA¹⁾: chemical index of alteration

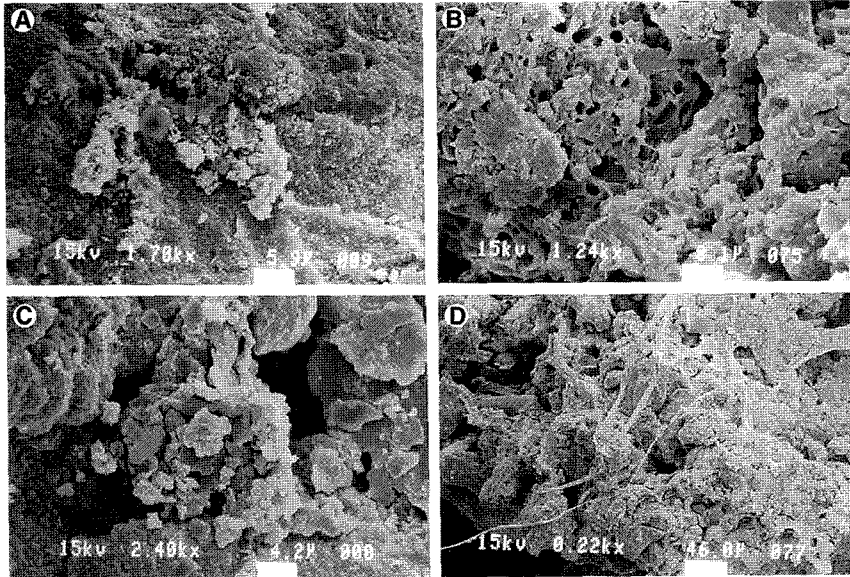


Fig. 11. Scanning electron microphotographs showing the clay minerals and micro-organism at the host rocks of the Buddha statue. (A) Kaolinite occurred the feldspar surface by chemical weathering. (B) Sponge shaped rootlets and fungus of lichen grown into the near surface of the rock material. (C) Kaolinitic clay minerals formed with feldspar boundaries. (D) Clay minerals and cryptoendolithic rootlets between the quartz and feldspar.

해석된다(Table 1).

각각의 조성을 일반적인 화강암의 평균 함량으로 표준화하면 대부분의 원소 TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , P_2O_5 가 결핍되어 있고 SiO_2 , Na_2O 는 부화되어 있으며 Al_2O_3 와 CaO 는 일정한 값을 갖는다. 이는 암석의 풍화작용에 의한 소실효과와 사장석, 정장석이 풍화에 따라 점토광물과 산화철 광물로 변질되면서 감소한 원소가 있기 때문으로 해석된다. 또한 모든 원소의 변화양상이 동일한 것으로 보아 동일한 분화과정을 경험한 암석임을 보여준다(Fig. 10).

마애불을 이루는 암석의 더욱 정밀한 진단을 위해 주사전자현미경에서 관찰해 보면, 장식들은 용식에 의하여 많은 공극이 발달된 것을 볼 수 있고, 공극과 입간에는 이차적으로 생성된 점토광물을 관찰할 수 있다(Fig. 11A, 11B). 대부분의 석영과 장식의 입자경계에서 장식의 풍화에 따라 생성된 점토광물이 결정면을 피복하고 있다. 또한 자형으로 성장한 고령석과 견운모의 집합체가 관찰되며, 사장석의 표면에는 미정질의 견운모 입자가 피막을 형성하였다(Fig. 11C). 석영과 장식의 경계에서는 고령석과 지의류의 뿌리와 균사체로 보이는 유기

물이 뒤엉켜 산출된다(Fig. 11D). 이 지의류의 뿌리 및 균사체는 암석의 화학적 및 기계적 풍화를 가속시키는 주요원인이 된다.

미생물이 석조물의 표면에 부착하게 되면 이들이 분비하는 이차대사 산물이 문화재의 표면에 얇은 생물막을 형성하여 다양한 조류와 하등식물의 포자가 부착할 수 있도록 도와준다. 또한 지의류의 표면 번식이 시작되며 이후 좀 더 긴 뿌리를 갖는 선대류와 양치식물의 천이가 일어나게 된다. 용암사 마애불에도 지의류, 선대류를 비롯하여 양치식물, 초본식물과 소나무까지 다양한 생물침해 상태를 보인다(Fig. 12A). 두상은 생물로 인한 훼손 상태가 비교적 양호한 편이고, 신부는 법의와 대좌의 선각된 틈 사이 그리고 광배의 가장자리에 고사된 지의류의 흔적이 약간 관찰된다. 반면 햇볕이 들지 않는 기반암 하부에는 짙은 녹색의 선대류가 약 60%의 피도를 이루며 왕성하게 서식하고 있다(Fig. 12B). 지의류 또한 고사된 것을 비롯하여 연두색, 회백색, 회흑색을 이루며 분포하고 있고 피도는 60% 이상이다.

마애불 우측의 절리대 역시 선대류와 회녹색, 연두색의 고사된 지의류가 관찰되었다(Fig. 12C). 좌측에는

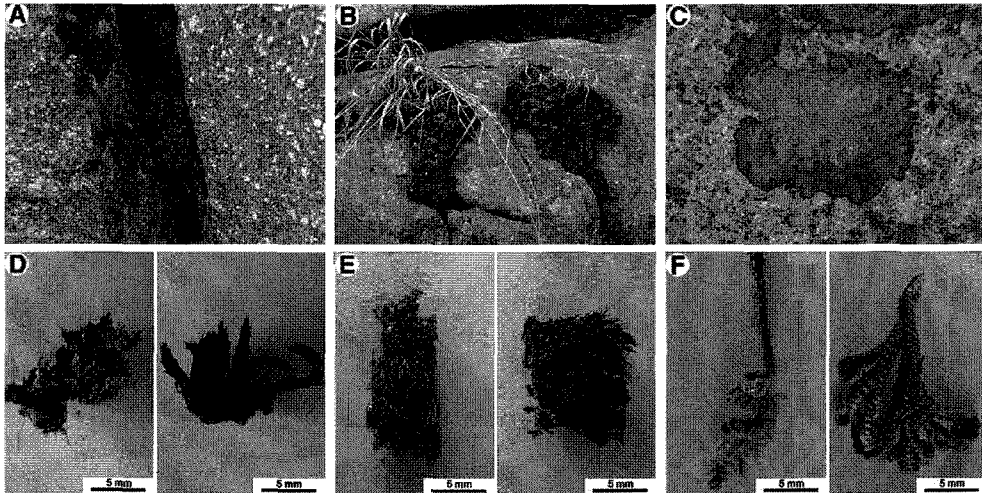


Fig. 12. Biological weathering and epilithic biospecies at the host rocks and the Buddha statue. (A, B) Some weeds grow in the joint systems. (C) Fixed lichen observed on the rock surface near the Buddha statue. (D) Foliose lichen and mosses. (E) Bryophyte. (F) Pteridophyta and Selaginella involvens.

회색과 밝은 주황색의 지의류가 전체적으로 분포하고 있고 전체 비례피도는 대략 40 % 이다. 기반암의 크고 작은 절리대에는 양치식물과 초본식물이 식생하고 있어 생물천이가 상당히 진행되어 있음을 알 수 있다. 마애불에 서식하던 생물군의 표본을 채집하여 동정하여보면엽상지의류, 선대류, 초본식물, 선대류, 양치식물 등 다양한 생물종군을 볼 수 있다(Fig. 12D, 12E, 12F). 토양화의 깊이를 나타내는 심도는 남조류, 지의류 및 선대류의 번식에 의해 암석의 표면이 얼마나 침식을 당하였는지 여부를 보여주는 지표가 된다. 이 마애불의 토양화 심도는 부분적으로 5 mm가 넘고 측면과 배면은 1~2 mm 정도로서 생물군이 회복한 곳은 암석의 박리현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화도 심하여 약한 충격에도 암편이 쉽게 떨어져 나온다.

4. 결론

1. 옥천 용암사 마애불의 구성암석은 반정이가 발달해 있는 흑운모 화강암이다. 조암광물은 반자형 내지 타형의 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모 등이다. 이 광물은 화학적 및 광물학적 풍화에 의하여 장석류와 흑운모는 입자경계와 벽개면에는 점토광

물과 철수산화 광물로 교대되어 있다. 이 마애불과 주변 암반의 전암 대자율 값의 범위는 2.14~4.64 ($\times 10^3$ SI unit) 정도의 비교적 높은 대자율 값을 가지고 있다.

2. 이 마애불이 선각된 기반암에는 두 방향의 주향(N10~22° W, N60~80° E)과 수직, 수평 및 저경사에 가까운 경사를 갖는 절리계와 이를 사교하는 크고 작은 절리계가 발달되어 있어 암반의 구조적 불안정을 초래하였다. 마애불 전면의 암반에 V자형 절리가 발달하고 있어 전방도피의 우려도 있다.
3. 이 마애불이 양각된 암반은 지표면으로부터 수직할 절리의 발달에 따라 여러 개의 암괴로 분리되어 있다. 또한 상부의 돌출된 자연암반까지 연장되어 암괴의 분리, 이탈 및 붕괴 위험으로 마애불의 구조적 안정성을 위협한다. 이 기반암에는 불연속면 군이 12 % 정도 존재하므로 마애불의 암반사면에는 평면파괴와 전도파괴뿐 아니라 쐐기파괴의 가능성까지 있어 구조적으로 불안정한 사면에 노출되어 있는 것으로 해석된다.
4. 이 마애불을 이루는 반상 흑운모 화강암은 일반적 인 화강암의 평균 함량에 비해 결핍된 K_2O 와 MnO 를 제외한 대부분의 원소가 부화되어 있으며 SiO_2 와 P_2O_5 는 일정한 값을 갖는다. 이는 암석의

- 풍화작용에 의한 소실효과와 사장석, 정장석 및 흑운모가 풍화에 따라 점토광물과 산화철 광물로 변질되면서 증가한 원소가 있기 때문으로 해석된다.
5. 주사전자현미경에서 관찰한 결과, 이 마애불의 암석에서는 이차적 풍화산물인 점토광물 및 표면을 부식시키고 있는 하등식물의 뿌리조직과 지의류의 뿌리와 균사체로 보이는 유기물이 관찰된다. 이들은 암석 표면 깊숙이 생물체가 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있어 이와 함께 암석 내에 점토 광물화가 상당히 진행된 것으로 판단된다.
 6. 이 마애불 및 주변에 분포하는 암석의 표면과 공극에는 지의류와 선대류의 오염이 심각하며, 절리대는 토양화의 진행에 의하여 잡초와 수근이 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있다. 따라서 생물학적 훼손과 불연속면에 서식하는 식생을 제거하기 위한 생화학적 처리도 필요하다.
 7. 마애불의 구조적 안정을 위한 지반공학적 보강방법과 표면마모, 기계적 및 생물학적 풍화를 저감하기 위한 석재의 보존과학적 처리가 필요하며, 주변 환경변화에 대한 장기적인 모니터링과 함께 풍화요소를 저감할 수 있는 대책을 강구해야 할 것이다.

사사

이 연구는 (주)엔가드 문화재연구소 및 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 지원된 공주대학교 문화재비과과진단연구실의 연구비로 완성되었음을 명기하며 이에 사의를 표한다.

참고문헌

1. W. Chesworth, "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, 305-313, (1971).
2. G.G. Amoroso and V. Fassina, "Stone decay and conservation". Materials Science

Monographs II, New York, Elsevier, (1983).

3. S.G. Lee and D.H. De Freitas, "A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea". Quarterly Journal of Engineering Geology, 22, 31-43, (1989).
4. J.L. Drever and J. Zobrist, "Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps". Geochimica et Cosmochimica Acta, 56, 3209-3216, (1992).
5. C.A. Price, "Stone conservation. An overview of current research". The Getty Conservation Institute, (1996).
6. 최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희, "충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책". 충청남도, 조사연구보고서, 425, (1999).
7. 이상현, "국내 석조문화재의 보전대책 수립을 위한 지질학적 고찰". 보존과학회지, 7, 9-18 (1998).
8. 이상현, "석굴암을 이루는 암석의 풍화현상". 보존과학회지, 8, 1-9 (1999).
9. 이찬희, 서만철, "대원사 다층석탑의 지질학적 및 암석학적 안전진단". 자원환경지질, 35, 355-368 (2002).
10. 이찬희, 이명성, 서만철, 최석원, 김만갑, "감은사지 서탑의 풍화훼손도 및 석재의 산지추정". 자원환경지질, 37, 569-583, (2004).
11. 이찬희, 김선덕, 한병일, 김영택, 이명성, "진천태화4년명 마애불의 풍화훼손도 평가와 보존처리". 보존과학회지, 16, 39-51, (2004).
12. 이찬희, 최석원, 한경순, 원경식, "경주 서악동 삼존불입상의 기계적훼손과 보존과학적 접근". 지질학회지, 37, 611-627 (2001).
13. C.H. Lee, S.W. Choi and M. Suh, "Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea". Geotechnical and Geological Engineering, 21, 63-77, (2003).
14. C.H. Lee, M.S. Lee, M., Suh and S.W. Choi, "Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural

- Heritage), Republic of Korea". *Environmental Geology*, 47, 547-557, (2005).
15. 문화재청, "문화재 상세정보, 옥천 용암사 마애불 입상". <http://ocp.go.kr/>, (2004).
 16. 김동학, 장태우, 황재하, "한국지질도(1/50,000 옥천도폭)". *자원개발연구소*, 21 (1978).
 17. S. Ishihara, "Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic granitic belts". *Resource Geology*, 48, 219-224, (1998).
 18. 정기영, 이병윤, "팔공산 화강암내 사장석의 풍화". *지질학회지*, 34, 44-57, (1998).
 19. H.W. Nesbitt and G.M. Young, "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites". *Nature*, 299, 715-717, (1982).
 20. H.W. Nesbitt and G.M. Young, "Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations". *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 48, 1523-1534, (1984).