

논산 관촉사 석조미륵보살입상의 암석학적 특성과 풍화훼손도

윤석봉¹ · 곽연천² · 박성미² · 이정은² · 이찬희^{2,*} · 최석원¹

¹공주대학교 지질환경과학과, ²공주대학교 문화재보존과학과

Petrological Characteristics and Deterioration State of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa Temple, Nonsan, Korea

Seok Bong Yun¹, Yean Chun Kaug², Sung Mi Park², Jeong Eun Yi², Chan Hee Lee^{2,*} and Seok Won Choi¹

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

²Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

The Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple consists of medium to coarse grained biotite granodiorite with dark grey color, and it has a weak gneissosity along the pegmatite veins. The results of magnetic susceptibility and geochemical patterns of the host rock of Standing Buddha Statue and the basement rock suggest that both values are formed from the co-genetic magma with the same differentiation process. The CIAs of the basement rock and the Standing Buddha Statue are calculated to 51.43 and 50.86, and the WPIs are estimated 4.52 and 8.95, respectively. So the weathering potential from the host rock of Standing Buddha Statue and basement rock prove to be high. The Standing Buddha Statue is terribly damaged with physical weathering from deterioration and exfoliation, and are scattered with secondary pollutant and precipitate. Basement rock is also in danger of ground collapse because of irregularly developed discontinuity system. Most surface of Standing Buddha Statue is seriously discolored into yellowish brown and dark gray, or black precipitates are also formed. Moreover, it is heavily covered with crustose lichen, fungi and algae, or moss are also found. In order to control the influential factors with the complex deterioration of Standing Buddha Statue, it is needed to rearrange a site environments, and conservation scientific management is required to protect it from covering lichens, exfoliations and fractures.

Key words : granodiorite, weathering, pollutant, lichen, discoloration, conservation science

논산 관촉사 석조미륵보살입상은 흑운모가 많은 중립 내지 조립질 화강섬록암으로서 암회색을 띠며, 미약한 편마상 구조 및 페그마타이트 세맥이 발달한다. 이 석불입상과 기반암의 전암 대자율 측정 및 지구화학적 분석 결과, 두 암석은 동일 마그마로부터 형성되어 거의 유사한 분화과정을 경험한 것으로 보인다. 이 암석의 CIA는 기반암이 51.43, 석불입상이 50.86이며, WPI는 각각 4.52와 8.95로서 이들은 모두 풍화잠재력이 큰 것으로 나타났다. 이 석불입상은 열화 및 박리에 의한 물리적 풍화가 진행된 상태이고, 이차적인 오염물질과 침전물질이 산재해있다. 기반암도 불연속면의 발달에 따른 지반붕괴의 위험성을 내포하고 있다. 이 석불입상의 표면은 황갈색으로 변색되어 있고 암회색 및 암회색 침전물이 형성되어 있다. 또한 고착지의류의 피도가 심하고 균류, 조류 혹은 선태류 등도 발견된다. 따라서 이 석불입상의 복합적 손상에 영향을 줄 수 있는 요인들을 제어하기 위한 주변 환경에 대한 정리가 시급하며 지의류에 의한 오염, 박리 및 균열로부터 석불입상을 보호하기 위한 체계적인 보존과학적 관리가 요구된다.

주요어 : 화강섬록암, 풍화, 오염물, 지의류, 변색, 보존과학

1. 서 언

논산 관촉사 석조미륵보살입상은 대한불교 조계종

제6교구 마곡사의 말사인 관촉사 내에 있는 거대 석불로서, 논산 시내에서 동남쪽으로 약 3 km 정도 떨어진 반야산 기슭에 있다. 관촉사가 있는 반야산은 화강암

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

질암의 노두가 분포하고 있어 석불조성을 위해서는 알맞은 조건을 갖추고 있다. 우리나라 최대의 석불이며 보물 제218호인 이 석불입상은 반야산의 남동쪽 방향을 바라보도록 세워져 있으며 미륵전의 법당 안에서 예불을 올릴 때 앞면이 보이도록 조성되어 있다.

우리나라의 석조문화재는 주로 불교와 관련이 있는 탑과 부도, 석불, 마애불, 비석, 당간지주, 석조 및 석등 등이 대표적이다. 이 중에서 석탑은 국보의 53.8%, 보물의 42.7%를 점유한다. 또한 시도지정 중요문화재로도 석탑과 석불이 가장 많다(Lee, 1998). 그러나 이들 석조문화재의 대부분은 아무런 보호시설 없이 야외에 노출되어 있어 풍화와 훼손에 취약한 실정이다.

지표에 노출되어 있는 화강암은 다양한 요인에 의한 기계적인 풍화작용을 받게 된다. 기계적 풍화작용과 함께 절리나 틈을 따라 침투한 물과 구성광물의 산화환원 반응, 탄산화작용과 같은 화학적 풍화작용은 암석의 색을 점진적으로 변화시킨다(Kim *et al.*, 1999). 최근 국내외적으로 석조문화재의 보존을 위한 활발한 연구가 진행 중이다(Ashurst and Dimes, 2001; Fidler, 2002; Lee *et al.*, 2003; 2005; Kim *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2004; 2005a; 2005b, 2005c). 그러나 국제적으로 석조문화재 보존재료와 수복기술에 적용할 수 있는 과학적 연구와 검증은 아직 부족한 실정이다.

석조문화재의 손상이 본격적으로 진행되는 생물층의 형성은 수백 년에서 천년에 가까운 시간이 필요하지만, 우리나라 대부분의 석조문화재는 이미 그 시간이 경과하여 본격적인 생물훼손이 진행되는 단계에 있다. 관측사 석불입상은 구조적으로도 불안정하며, 위와 같은 화학적 및 생물학적 풍화를 받았다. 또한 부재와 부재 사이에 드러나 있는 철심은 심하게 산화되었다. 이 석불을 구성하는 암석의 표면에는 박리, 박락 및 균열이 산재하며 거의 모든 부재의 표면에서 지의류에 의한 오염 흔적이 발견된다.

이 관측사 석불입상에 대하여는 심도있는 미술사학적 및 불교사학적 연구(Kim, 1985; Choi, 1992; Choi, 2000)가 있으나 암석학적 및 보존과학적 연구는 Choi *et al.*(1999)의 간단한 보고가 있을 뿐이다. 따라서 이 연구에서는 고려시대를 대표하는 석조문화재인 관측사 석불입상의 암석학적 특성을 분석하고 물리화학 및 생물학적 풍화훼손도를 진단하였다. 이 결과는 이 석불의 종합적인 보존대책을 수립하는데 기초자료가 될 것이며, 과학적 원형복원 및 수리지침을 수립하는데 이용될 것이다.

2. 산출상태 및 연구방법

2.1. 산출상태

반야산을 배경으로 약간 경사진 화강섬록암 노두 위에 자리 잡은 이 관측사 미륵보살입상은 대좌를 따로 만들지 않고 자연암반에 발을 조각하고 상체, 하체, 양팔을 별도의 큰 석재로 짜 맞추어 하나의 상을 이루는 형태로 조성되었다. 머리 위에는 위로 갈수록 점점 좁아지는 형태로 맨 윗부분을 8각으로 다듬은 원통형 보관을 씌웠고 그 위에는 2중의 4각형 보개가 올려 있다(Fig. 1). 보개 하단에 양각된 8엽의 연화문과 네 모서리 풍탁은 부여의 대조사 대불을 비롯한 10세기에서 11세기 무렵에 조성된 존상들에서 나타나는 특징이다(Choi, 1992). 장방형의 2중 보관은 그 모양이 제왕들이 썼던 면류관 형태와 비슷한 모습을 보여주고 있다.

체구에 비하여 큰 얼굴은 눈, 코, 입이 얼굴 전체에 팽 차도록 다듬어져 평면적 이미지의 얼굴을 극복하고 강한 인상을 풍기며, 일자형의 눈매는 매우 날카롭게 보이나 흑색세일로 다듬어진 눈동자가 석불의 이미지를 사실감 있게 표현하고 있다. 둥그런 미간 가운데에는 커다란 백호가 있는데 청동제 백호로부터 녹물이 흘러 보살상의 얼굴이 오염되고 있으므로, 1960년에 이를 유리 수정으로 바꾸었다고 한다(Choi, 2000).

코와 귀는 모두 크고 귀는 양어깨까지 늘어서 있으며 3단 3열의 보발이 귀의 중앙을 통과한다. 귀 아래에는 구멍이 뚫려 있어 귀걸이 장식을 하였던 것으로 여겨진다. 입은 팽 다물어져 엄숙한 이미지를 풍기고 있다. 몸체는 거대한 돌을 원통형으로 깎아 만든 직선형으로 매우 단조로운 이미지를 나타내고, 법의의 밑주름 표현은 부분적으로 매우 변화 있는 곡선을 사용하여 옷 주름의 겹치는 형태를 보여주고 있다.

또한 정면에서 좌우측면으로 돌아가면서 치석흔이 거칠게 마무리되어 있으며, 배면은 특별히 문양이나 다른 형상을 조각하지 않고 거칠게 다듬기만 하였다. 배위쪽으로 들어 올린 두 손 중 왼손의 손목이 부자연스럽게 보이지만 오른손은 자연스럽게 다듬어졌다. 대좌는 별도로 만들지 않고 자연석을 다듬어 그 위에 직접 세웠는데 이는 불상의 규모와 중량이 너무 컸기 때문일 것이다. 석불입상 전체의 조형은 입체감이 작고 도식적이며 비사실적으로 표현되었다.

현재의 산출상태를 조선고적도보(JGK, 1916)에 나타난 사진과 비교해볼 때, 관측사 석불입상 전체의 모습은 원형 그대로의 모습이라 판단되지만 부분적인 장식들이 자연적이고 인위적인 변화가 있다(Fig. 1). 이 석

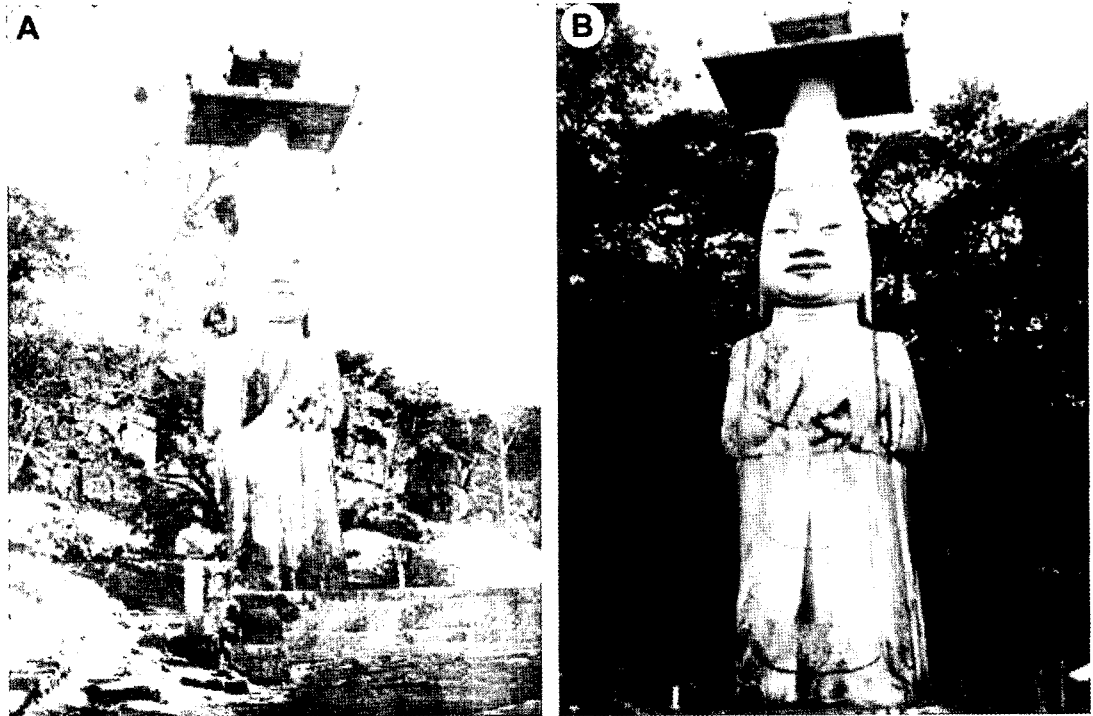


Fig. 1. Frontal view of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. (A) Photograph is Standing Buddha Statue in 1916. (B) The present field occurrence of Standing Buddha Statue.

불입상의 후면에는 금방이라도 사태가 발생할 듯이 보이는 암석들이 분포해 있으며, 후면의 기반암 사이에서 유출된 지하수가 지면의 경사로 인해 석불입상 쪽으로 흐르고 있다. 따라서 이 석불입상의 손상을 방지하기 위한 다각적인 보존대책이 요구된다.

2.2. 연구방법

우리나라에서 석조문화재의 재료로 쓰인 암석은 화강암, 편마암, 현무암, 응회암, 대리암, 점판암, 사암, 석회암, 안산암 등 그 종류가 매우 다양하지만, 주로 화강암과 화강편마암이 80% 정도를 차지한다. 이는 한반도 구성암석의 점유율을 반영하는 것이다(Lee and Lee, 2005). 관촉사 석불입상 역시 화강섬록암으로 이루어져 있으며, 기상변화 및 대기로부터 침해를 받기 쉬운 옥외에 노출되어 있다. 따라서 암석 구성성분의 용해, 표면의 박리 및 박락, 균열, 구조적 불안정, 생물천이로 인한 풍화 등으로 심하게 손상되어있다.

이 연구에서는 석불입상 주변의 지형과 지질조사, 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화특성을 연구하였다. 육안관찰과 아울러 석불입상과 주변 기반암에 대한 대자율도 측정하였다. 대자율 측정은 10^{-5} SI 단위의 측정

한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하였고, 대자율의 세기는 10^{-3} SI 단위계를 사용하였다. 또한 실내에서 암석학적, 광물학적 및 화학적 정밀분석을 수행하기 위하여 석불입상에서 박락된 암편을 시료로 수습하였다. 이 불상과 기반암에 발달된 불연속면의 응력을 해석하고자, 균열대의 주향과 경사를 측정하여 평사투영도와 로즈 다이어그램에 투영하고 DIPS 프로그램을 이용하여 암반사면의 안정성을 검토하였다.

한편 편광현미경을 사용하여 석재의 반정량적인 광물조성, 광물학적 공생관계, 조직과 풍화에 대한 변질 광물 등을 관찰하였다. 편광현미경은 자동계수기가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경을 사용하였다. 구성암석의 조암광물에 관한 조성비와 광물 중, 풍화에 따른 광물 및 생물학적 변화를 관찰을 위하여 주사전자현미경(SEM) 분석을 실시하였다. 분석기기는 Oxford 사의 에너지 분산형 성분 분석기(EDX, Inca M/X)가 장착된 JEOL 사의 JSM-6335F 모델이 사용되었다. 분석시료는 탄소와 금으로 이중 피복한 것을 이용하였다.

암석의 광물조성을 밝히기 위해 X선 회절분석(XRD)

을 실시하였다. 분석기기는 Rigaku제 모델 D/Max-IIB였고 X선은 $\text{CuK}\alpha$ 에 조건은 30 kV와 150 mA 이다. 이 암석의 주성분 원소 화학분석은 X선 형광분석기(XRF)를 이용하였으며 분석기기는 RIX 2100 모델이었다. 미량 및 희토류 원소의 분석은 유도결합 아르곤 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 중성자활성분석기(INAA)를 이용하여 정량화 하였다.

3. 주변환경

3.1. 지형 및 기상학적 특징

관촉사가 있는 논산시는 충청남도의 중남부에 위치하고 있으며 전형적인 분지지형을 형성하고 있다. 동안부 일대는 계룡산맥과 대둔산 줄기가 서로 교차하여 협준한 지형을 이루며 북서부는 남서부와 함께 해발 60 m 내외의 구릉을 형성하고 있다. 서북부 지역은 화강암류와 변성암류로 구성되어 있으며, 비교적 낮은 여러 봉우리들이 상호 연봉을 이루며 북북동-남남서 방향으로 연계되어 있다. 중앙부 지역은 화강암질암으로 구성되어 있으며 넓은 구릉과 평야지대를 이룬다. 동부 지역은 남북방향의 능선을 따라 북으로는 공주 지역의 계룡산으로 이어진다.

관촉사는 논산시 동남부의 반야산의 동쪽 기슭에 위치하고 있으며 앞쪽으로 평지가 펼쳐지고 그 사이로 논산천이 흐르고 있다. 뒤쪽으로는 반야산이 둘러싼 전형적인 배산임수 형태를 이루고 있다. 논산 지역의 연평균 기온은 10.8°C이며, 8월의 평균 기온은 25.2°C이고 1월의 평균 기온이 -5.4°C로서 편차가 16.1°C로서 다른 도시에 비하여 겨울철에도 비교적 온난한 특성을 갖는다. 연평균 강수량은 1,396 mm이며 6월에 가장 많은 334 mm를 10월에 가장 적은 0.7 mm를 기록하였다(Nonsan City, 2005). 논산 인근 지역의 1월 및 8월 평균 기온과 강수량을 비교해 볼 때, 8월의 평균

기온은 거의 비슷하지만 논산의 1월 평균 기온은 인근 지역에 비하여 다소 떨어진다. 그러나 강수량은 인근 지역과 비슷하다.

3.2. 지질학적 특징

논산 일대의 지질은 크게 시대미상의 변성퇴적암류인 공주편마암 및 편암, 육천층군과 중생대 화성암류로 대별된다. 중생대 화강암류는 남서로 강경과 유성 지역으로 연장 분포되는 대상암체의 일부분으로 극지적으로 편마상 구조를 갖거나 유색광물이 운집된 암상을 보인다. 이는 남한 중부 지역에 흔하게 나타나는 쥬라기의 동시구조 관입암의 특징과 유사한 것이다. 이들은 화강섬록암, 반상화강암, 세립질 석영문조니암 및 복운모 화강암으로 구성된다. 비변성 퇴적암은 논산 서남단에 소규모로 분포하고, 맥암류는 논산지역 중앙부에서 남북으로 흐르는 노성천을 경계로 동쪽 지역에 남북방향으로 무수히 관입하고 있다(Chang and Hwang, 1980).

관촉사가 있는 반야산 일대를 포함하는 쥬라기의 화강암류는 풍화에 약하기 때문에 일반적으로 낮은 구릉이나 저지대를 형성하고 있다. 이 화강암류는 주로 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모 및 각섬석 등으로 구성되어 있으며, 흑운모와 각섬석 함량의 차이에 의하여 흑운모 화강암, 각섬석 화강암 및 화강섬록암 등으로 구별된다. 관촉사 일대는 흑운모가 주요 유색광물인 흑운모 화강섬록암이 분포하고 있다. 부분적으로 편마상 구조나 반상 조직이 발달하기도 한다. 관촉사 내에 분포하는 암석에서도 부분적인 반상조직이 발견된다.

4. 암석학적 특성

4.1. 암석 및 광물학적 특징

관촉사 석불입상을 이루는 암석은 육안적으로 볼 때,

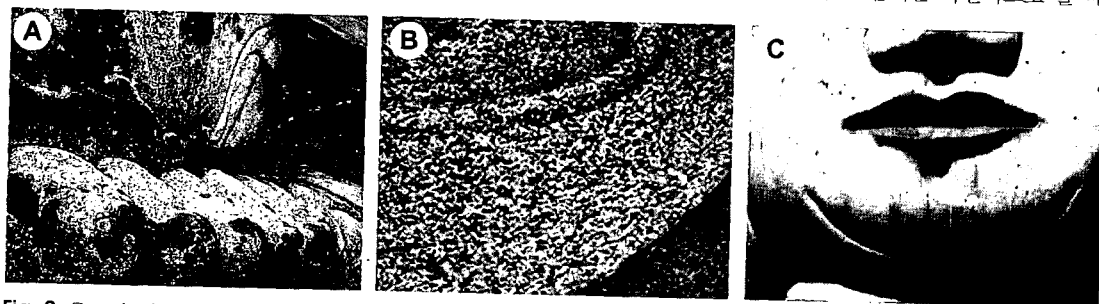


Fig. 2. Constituting rock properties of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. (A) Outcrop of the granodiorite which the foot is sculptured. (B) Coarse-grained granodiorite with lots of biotite. (C) Pegmatite veinlets cross a face in the host rock.

흑운모를 주요 유색광물로 하는 중립 내지 조립질의 화강섬록암이다(Fig. 2A, B). 이 암석의 색은 암회색 또는 담회색이며 주변에 분포하는 기반암과 동일 종류의 암석으로 보인다. 또한 이 화강섬록암에는 사교하는 페그마타이트 세맥이 관찰되기도 하며(Fig. 2C), 드물게는 미약한 편마상 구조도 보인다. 부분적으로 유색과 무색광물의 비가 다르며 경계가 점이적인 불규칙한 산출상태를 보인다.

이 석불입상의 구성암석과 기반암의 전암 대자율을 측정하였다. 화성암의 전암대자율은 성인적 유형에 따

라 고유의 범위를 가져 화성암의 기재적 분류에 이용되어 왔다(Ishihara, 1998; Jin *et al.*, 2001). 또한 최근에는 석조문화재 구성부재의 원산지 해석을 위한 보조적 연구수단으로도 많이 이용되고 있다(Uchida *et al.*, 1999; Jwa *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2005b; Yang *et al.*, 2006).

이 석불입상의 대자율 범위는 $6.6 \sim 15.7(\times 10^{-3}$ SI unit) 정도로 전체적으로 높은 값을 보였다(Fig. 3). 평균값은 11.63이며, 주변 기반암은 $6.6 \sim 14.2$ (평균 10.65)로서 석불입상의 대자율 값이 약간 높지만 서로 동일

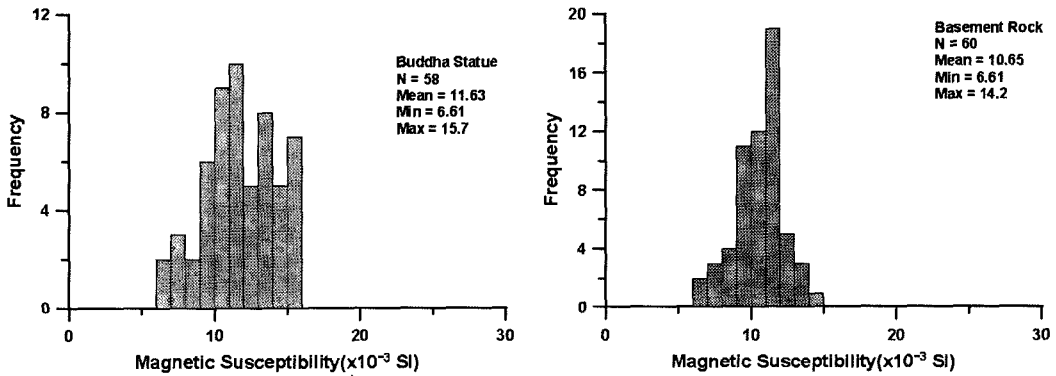


Fig. 3. Histogram showing magnetic susceptibility ($\times 10^{-3}$ SI) of Standing Buddha Statue and basement rock in the Gwanchoksa temple.

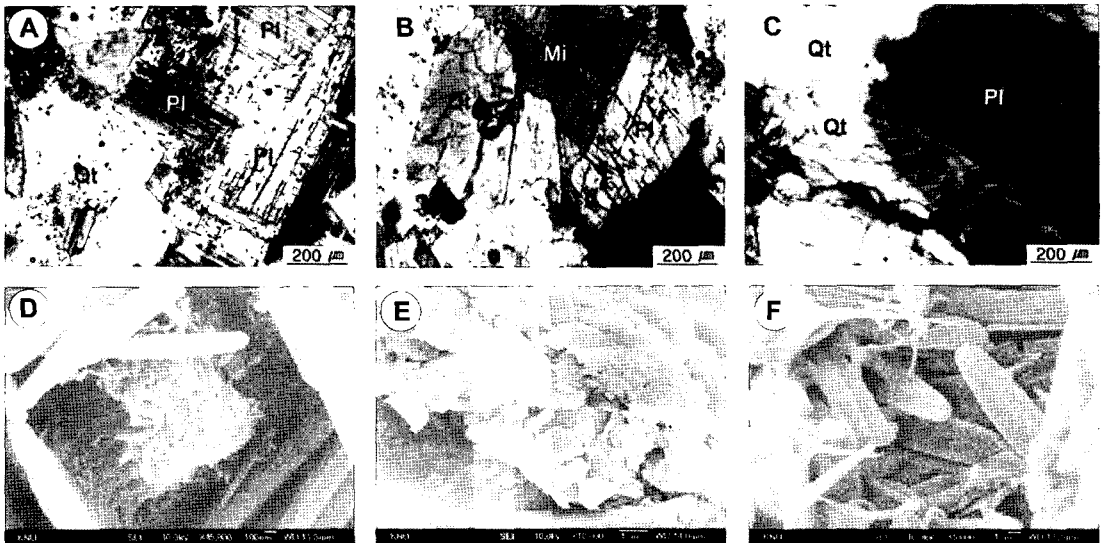


Fig. 4. Microphotographs and scanning electron microphotographs (SEM) for rock forming minerals of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. (A) Quartz and plagioclase replaced by perthite assemblages which feldspars altered to secondary clay minerals along the twin planes. (B) Grain boundaries and biotite cleavages showing secondary clay alteration by mineral assemblages of quartz, biotite and plagioclase. (C) Microcrystalline quartz and feldspar show sutured texture, and matrix shows secondary alteration. (D) Kaolinite coexist halloysite within micro-cavities of feldspars. (E) Amorphous clay minerals from the boundary between the feldspars. (F) Diatom and micro-organisms are insight inside of the open spaces on surface contaminants. (Pl; plagioclase, Qt; quartz, Mi; mica).

한 분화과정을 겪은 유사한 종류의 암석으로 해석할 수 있다. 이 암석들은 대자를 값으로 보아 자철석 계열에 속한다. 이는 Jin *et al.*(2001)이 보고한 논산 일대 화강암류의 대자를 값(6.0×10^{-3} SI unit)과도 거의 일치하는 것이다.

암석의 구성광물을 동정하기 위하여 석불입상과 같은 암종의 편을 가지고 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 이 석불입상을 이루는 암석은 흑운모, 석영, 사장석, 정장석 등과 같은 화강암의 흔한 조암광물들로 구성되어 있다. 이 암석에서는 정장석 및 사장석의 상호 교대조직이 관찰되었으며, 대부분의 장석류는 입자 경계와 쌍정면을 따라 점토광물로 변질되어 있다(Fig. 4A). 또한 흑운모는 입자경계와 벽개면을 따라 녹니석화되어 있으며(Fig. 4B), 거칠질 석영과 장석의 융합선상 조직에는 변질된 기질물질이 충전하였다(Fig. 4C).

이 석불입상의 암편에 대하여 주사전자현미경 관찰을 실시하여 구성암석 내부의 미세조직과 산출상태를 관찰하였다. 이 결과, 침주상 할로이사이트와 저결정도의 카올리나이트가 공존하는 모습을 관찰하였으며(Fig. 4D), 자생 미정질 점토광물들의 혼재양상도 관찰하였다(Fig. 4E). 또한 표면 오염물 내부에서는 다발모양의 지의류 균사체와 구조류의 모습(Fig. 4F) 등을 확인할 수 있었다. 이는 암석의 미세분해 작용이 진행되고 있다는 증거이기도 하다.

이 암석들의 구성광물과 풍화되어 나타나는 점토광물 등을 확인하기 위하여 X선 회절분석을 실시하였다(Fig. 5). 분석결과, 화강섬록암의 조암광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 등이 동정되었으며, 회백색 침전물이 피복된 시료에서는 방해석이 검출되기도 하였다. 이는 석불입상의 균열과 이력에 충전되어 있던 시멘트 물질이 용해되어 생성된 것으로 보인다. 일부 심한 풍화를 받은 시료에서는 녹니석과 같은 점토광물도 검출되었다(Fig. 5).

4.2. 지구화학적 특징

이 연구를 위하여 주성분, 미량 및 희토류 원소의

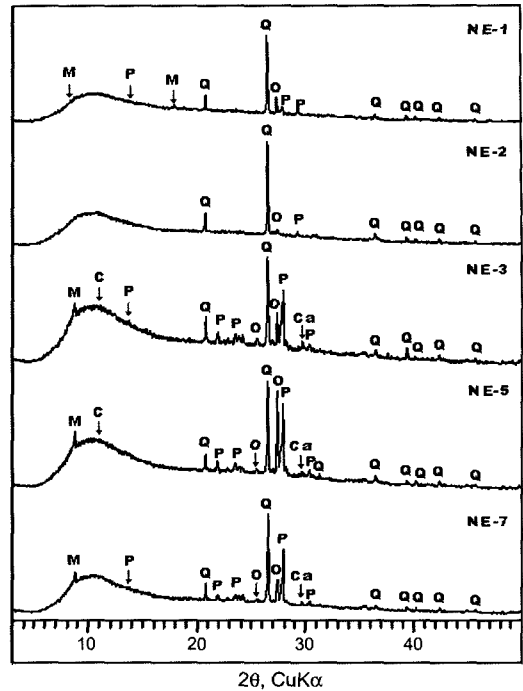


Fig. 5. X-ray powder diffraction pattern showing host rock of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. M; mica, C; chlorite, Q; quartz, P; plagioclase, O; orthoclase, Ca; calcite.

거동특성을 분석하였다. 주성분 원소의 함량은 전형적인 화강섬록암의 조성을 보였다(Table 1). 기반암(BR-1)에 비하여 석불입상의 구성암석(NE-1)에서 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 를 포함한 대부분의 주성분 원소 함량이 다소 높게 검출되었다. 이 주성분 원소의 부화와 결핍 정도를 비교하기 위하여 Nockold and Allen(1954)의 평균 화강암 조성으로 표준화 한 결과, 대부분의 원소(Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , P_2O_5)는 부화되어 있으나 MnO 와 K_2O 는 결핍되어 있다(Fig. 6A). 이 원소들은 풍화작용에 의하여 소실된 것으로 설명할 수 있다.

또한 주성분 원소의 중량비를 분석한 결과, $Al_2O_3 > Na_2O + CaO + K_2O$ 의 관계가 성립되는 것으로 보아 이

Table 1. Chemical composition of major oxide elements about the host rock of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple (unit: wt.%).

No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	CIA ¹⁾	WPI ²⁾
BR-1	71.34	0.45	13.95	3.03	0.04	0.85	2.51	3.24	3.03	0.19	1.49	100.11	51.43	4.52
NE-1	70.11	0.54	15.36	3.32	0.04	0.96	2.92	3.57	3.38	0.18	0.62	100.93	50.86	8.95

Fe₂O₃; total Fe₂O₃, LOI; loss-on-ignition, CIA¹⁾; chemical index of alteration, WPI²⁾; weathering potential index by Nesbitt and Young(1982; 1984).

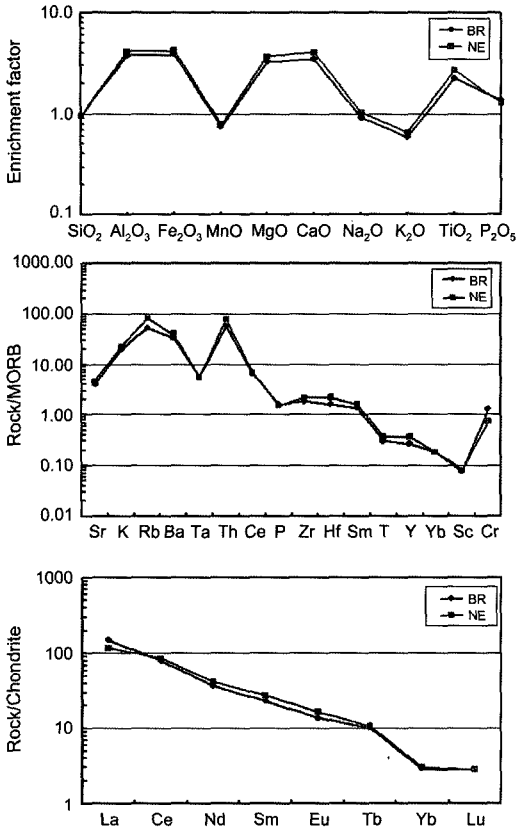


Fig. 6. Diagram showing normalized chemical patterns about the host rock of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. (A) Patterns of the major element by standard granite composition. (B) Patterns of the trace element by mid-oceanic ridge basalt. (C) Patterns of the rare earth elements by chondrite compositions. Sample numbers are the same as those of Table 1, 2 and 3.

암석들은 고알루미나형 화강암질암에 해당한다. 총 알칼리 함량은 6.95 wt.%로 비교적 낮으나, 이는 장석류가 풍화에 의해 점토광물로 재결정화 되면서 알칼리의 함량이 감소하였기 때문으로 해석된다. 이 분석치를 대상으로 화강암의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(chemical index of alteration; CIA)와 풍화잠재지수(weathering potential index; WPI)를 구하였다(Nesbitt and Young, 1982; 1984). 이 결과, 석불입상 시료의 CIA는 50.86, 기반암은 51.43을 보였고, WPI는 석불입상의 시료에서 8.95, 기반암에서 4.52의 값으로서, 현재 석불입상의 화학적 풍화정도와 풍화잠재력이 높은 것으로 나타났다.

주성분 원소와 동일한 방법으로 일부 미량원소의 거동특성을 살펴보았다(Table 2). Fig. 6B는 Pearce(1983)

Table 2. Chemical composition of trace elements about the host rock of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple (unit: ppm).

No.	Ba	Co	Cs	Hf	Rb	Sc
BR-1	671	9	3.0	3.8	103	3.0
NE-1	803	8	3.7	5.2	106	3.2

No.	Sr	Ta	Th	U	Y	Zr
BR-1	470	0.45	11.6	2.6	8	163
NE-1	545	0.54	15.8	1.8	11	188

Table 3. Chemical composition of rare earth elements about the host rock of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple (unit: ppm).

No.	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
BR-1	46.3	65	22	4.5	1.0	0.48	0.60	0.09
NE-1	36.4	69	25	5.3	1.2	0.50	0.63	0.09

의 조성으로 표준화한 위 분석시료의 미량원소에 대한 진화경향으로서, 기반암과 석불입상의 구성암석에서 미량원소 진화경향이 거의 일치하고 있음을 보여준다. 특히 Cr, Hf, Ta, Zr, Y와 같은 고장력 원소가 서로 동일한 함량비를 갖는다는 것은 기반암과 석불입상이 동일한 마그마 기원의 암석을 지시하는 증거이다.

이 석불입상의 구성암석과 기반암을 대상으로 일부 희토류 원소를 분석하였으며(Table 3), 이들의 변화를 해석하고자 Boynton(1984)의 운석조성으로 표준화하였다. 이 결과, Fig. 6C와 같이 다소 일관성 있는 패턴을 유지하였으며 위로 볼록한 경희토류와 아래로 처진 중희토류의 전형적 분화경향을 보여주었다. 또한 기반암과 석조불상의 희토류 원소 분포 패턴이 일치하였다. 그러나 기반암이나 불상의 시료 모두에서 Eu의 이상을 보이지는 않았다. 따라서 이 석불입상의 구성암석과 기반암은 마그마의 기원이 같았을 것으로 추정할 수 있다.

5. 풍화훼손도 진단

5.1. 기계적 풍화

이 석불입상은 전면 방향이 S70°E로서 앞쪽 평지를 제외하고는 모든 방향이 기반암과 잡목으로 둘러싸여 있다(Fig. 7A). 지반은 전면으로 약간 경사진 화강섬록암 노두이고 발을 자연암반에 직접 조각하였기 때문에 경사 각도상의 위험은 크지 않다. 주변의 노두는 전반적으로 앞쪽으로 3° 정도 경사진 상태이다. 그러나 노두의 끝 부분에서 지하수가 흘러나오고 있어, 석불입상의 무게와 규모를 고려할 때 지반 침하 가능성을 배

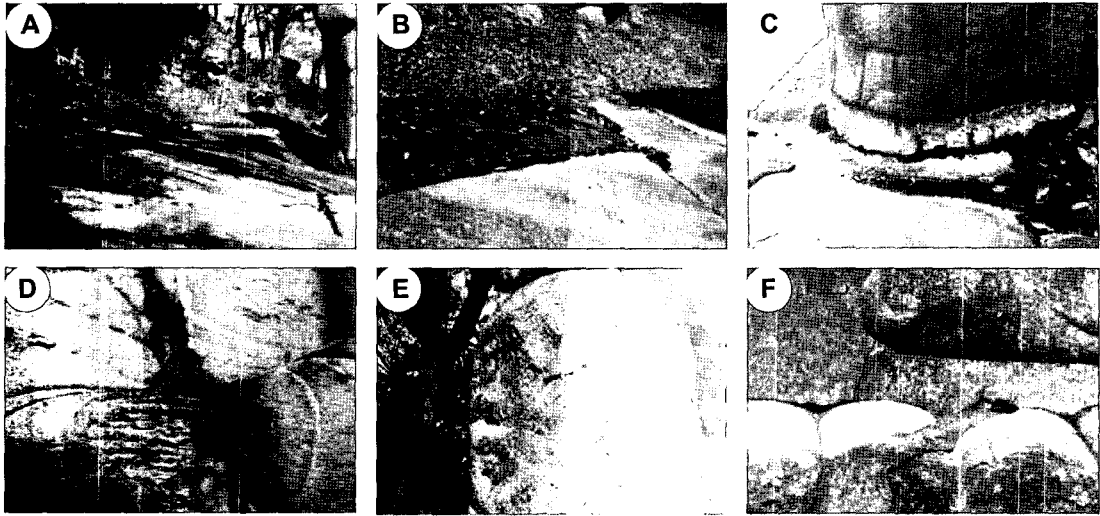


Fig. 7. Site environments and mechanical weathering of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. (A) Basement condition of the host rock located in the back side of the Buddha Statue. (B) Groundwater come out from between the basement rock of the back side flow by ground inclination toward the Buddha Statue. (C) Features of the groundwater and the algae spill in the back side of the Buddha Statue. (D) The parts of fixed rocks with iron plates were damaged, and the rock surface coated by oxidation of inserted iron plates. (E) Surface of the host rock is weakened because of surface exfoliation. (F) The concrete which filling up damaged parts showing cracks and contamination.

제할 수는 없는 상태이다(Fig. 7B, C).

기반암에 발생한 절리는 결과적으로 암석의 물성을 약하게 하고, 암석에 작용했던 압력의 감소와 물의 동결에 의한 부피변화는 암석의 구조적 안정에 타격을 가한다(Lee and Suh, 2002). 이 석불입상과 주변의 기반암에는 크고 작은 균열이 발달되어 있어 구조적 불안을 야기하고 있다. 또한 법의 우측 하단부분의 치석 흔적과 등 부분의 쪼아낸 흔적은 이 석불입상의 인위적 훼손을 실감할 수 있다. 결손 부위의 시멘트 충전은 오히려 이들의 균열 및 결실에 의해 암석의 이차적 풍화를 촉진하고 있다. 보개부분은 전면 모서리의 균열이 심하여 무쇠로 연결하기도 하였다.

양쪽 팔에는 부재의 고정을 위해 철심을 집합하였던 곳이 암석의 파손으로 처리 부위가 노출되고 기계적 풍화를 받아 표면이 훼손되었다(Fig. 7D). 전면의 북부에도 균열이 나타나고 양쪽 어깨에서는 박리와 박락이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 7E). 오른쪽 둘째와 셋째 발가락 부분은 일부가 파손 이탈되어 시멘트로 충전하였다. 또한 좌우와 후면 모두 시멘트 정착 흔적이 보이며 우측은 넓게 벌어져 있다(Fig. 7F).

5.2. 불연속면의 안정성 해석

암반에 발달된 불연속면의 유무는 사면의 안정에 매우 중요한 영향을 미치며, 이들의 구조적 특징들을 알아

내는 것은 안정성 연구의 기본이다. 이미 영주 가흥리 마애삼존불에서는 암반사면의 붕괴를 경험하였으며, 옥천 용암사 마애불은 불연속면의 접합을 실시하기도 하였다(Lee *et al.*, 2005a; 2005b). 따라서 관측사 석불의 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 WINDOW용 프로그램인 DIPS를 이용하여 평사투영법에 의한 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴의 안정성을 검토하였다(Fig. 8).

암반의 평면파괴는 중력의 작용에 의해 암괴가 평면 활동을 일으키는 경우 취약면의 경사방향에 평행하게 이동하는 것이다. 암반사면에서 비교적 드물게 발생하는 것으로 질서정연한 지질구조를 가지는 암반에서의 파괴유형이다. 주로 파괴면의 경사각이 사면의 경사각보다 더 작아야하고 그 파괴면의 마찰각보다 클 때 발생한다. 쉐기파괴는 두 불연속면이 경사면을 사교하며 그 교선이 경사면에 드러나 있을 때 발생한다. 이 교선의 경사가 마찰각보다 상당히 클 경우, 이 불연속면 위에 놓여 있는 쉐기형 암반은 교선을 따라 아래로 활강하는 것이다. 전도파괴는 암주나 암석 블록들이 고정된 기준점에 대해 회전하며 파괴되는 현상이다.

이 석불입상의 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 두 구역으로 나누어 측정하였다(Fig. 8). 1지역의 기반암에서는 주로 $N10^{\circ}\sim 20^{\circ}W$ 의 주향과 $N80^{\circ}\sim 90^{\circ}E$ 의 주향을 갖는 불연속면이 발달하며, 2지역의 기

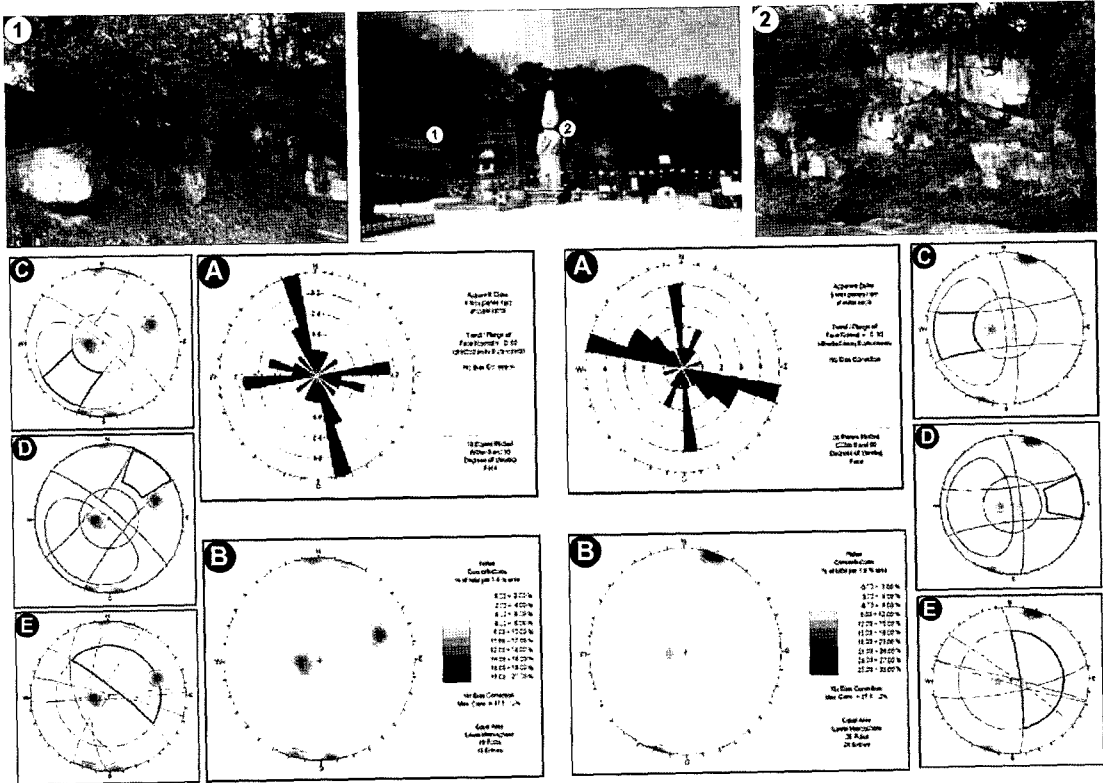


Fig. 8. The joint systems and diagrams plotted on discontinuity systems in the basement rock of Standing Buddha Statue. The No. 1 area; Rose diagram (A) and Stereo-net (B). Diagrams showing possible fields of planer failures (C), wedge failures (D) and topping failures (E). The No. 2 area; Rose diagram (A) and Stereo-net (B). Diagrams showing possible fields of planer failures (C), wedge failures (D) and topping failures (E).

반암에서도 두 방향의 불연속면(NS~N10°W, N60°~80°W)이 나타난다. 이들의 경사는 거의 수직과 수평에 가까운 것들이 혼재한다(Fig. 8A, B). 이 절리계들은 암반의 기계적 파괴와 붕괴의 원인이 되며 석불입상에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 각각의 도식도에서 관찰각보다는 크고 사면의 경사각보다는 작은 위치가 초승달 모양의 영역으로서, 사면의 주향과 ±20° 되는 영역이 파괴가 가능한 장소이다. 그러나 1과 2지역 모두가 안에 도시되는 불연속면이 거의 없는 것으로 보아 평면파괴의 가능성은 없을 것으로 판단된다(Fig. 8C).

썰기파괴의 가능성을 도시한 영역은 Fig. 8D로서, 사면의 경사각보다는 작고 관찰각보다는 큰 영역인 길쭉한 초승달모양의 영역이다. 이 영역에 불연속면이 교차할 때 썰기파괴의 가능성이 있다. 이 암반에는 두 방향의 불연속면들이 파괴영역 안에서 교차하지 않는 것으로 보아 썰기파괴의 가능성은 낮은 것으로 판단된다. Fig. 8E는 전도파괴를 도시한 것으로 잘 발달된 급경사의 불연속면으로 분리되어 있는 연속적인 암주

들이 전방으로 구부러짐에 따라 사면의 방향과 평행하게 굴곡되어 붕괴될 가능성이 있는 영역이다. 결과적으로 1지역과 2지역 모두 평면파괴와 썰기파괴에는 안정하지만 부분적으로 전도파괴의 가능성이 있는 것으로 확인되었다.

5.3. 화학적 풍화

관촉사 석불입상은 현재 암석의 화학적 풍화정도와 풍화잠재력이 높은 것으로 나타났다. 또한 이 석불입상의 표면에서 관찰되는 화학적 풍화의 양상도 매우 심각하다. 암석의 화학적 풍화는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 암석의 구성성분, 성질 및 조직을 파괴함으로써 암석을 변화시킨다. 이에 따라 산화염광물, 점토광물, 탄산염광물 또는 증발물이나 환원물과 같은 잔류물을 생성하며 암석의 색이 변하게 된다.

이 석불입상은 후면을 제외한 모든 방향에서 황갈색 침전물이 발견되었는데, 이는 조암광물들 사이에 발달된 미세한 균열대를 따라 철수산화물이 충전되어 야기

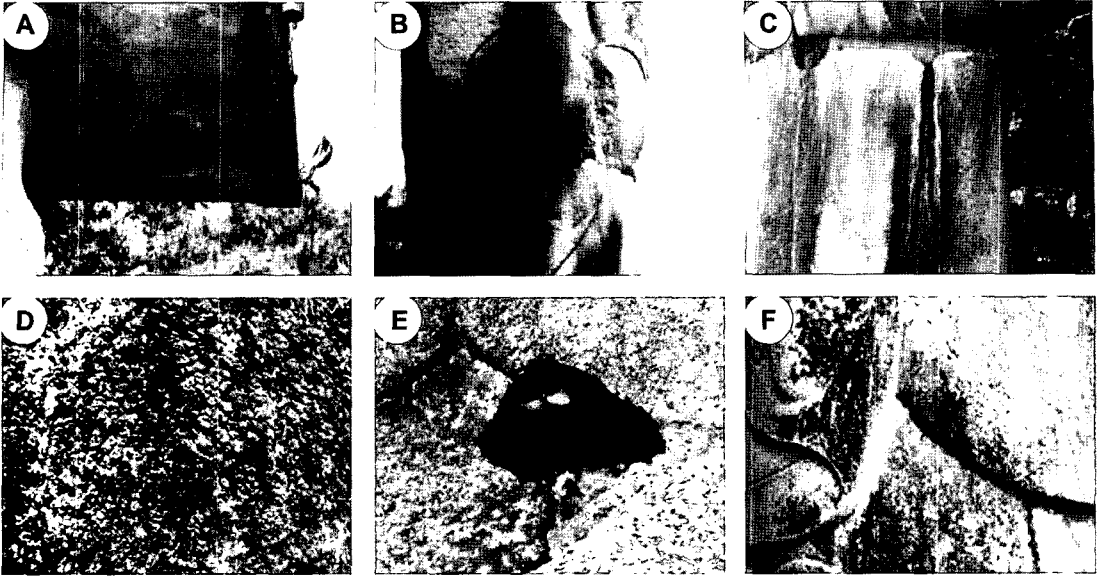


Fig. 9. Photographs showing chemical weathering and biodeteriorations of Standing Buddha Statue in the Gwanchoksa temple. (A) Yellowish brown discoloration by corrosion of iron plates which connected to cracked parts. (B) The parts discolored by secondary oxidation of inserted iron plates. (C) Light grey precipitates occurred in the side due to the reaction of concrete and rainwater. (D) Lichen covered on surface. (E) Plants spontaneous generating on damaged parts. (F) Algae and lichen showing blue green or yellow brown spots are a parasite on surface.

된 변색으로 판단된다. 이들은 주로 강수의 이동흔적을 따라 생성되어 있다. 보관 하단의 연화문은 유수와 철산화물의 영향으로 암흑색으로 변색되어 있으며, 이중보관 네 모서리에 달려있는 청동계 화염문의 철물과 풍탁은 부식이 진행되면서 암석에 영향을 끼치고 있다. 또한 부재의 고정을 위해 틈 사이에 끼워둔 철심이 노출되어 이들의 부식으로 주변부 암석이 적갈색으로 변해 있다.

균열된 암석을 연결한 철정 부분도 황갈색으로 변색되어 있다(Fig. 9A). 좌우측 허리 부분의 철정은 산화에 의해 주변 부위가 적갈색으로 변해 있으며(Fig. 9B), 하단 부위는 강수의 유동 흔적을 따라 철산화물이 피복되어 있다. 이 부분을 보강한 콘크리트들도 강수와 반응에 의하여 백화현상 등과 같은 회백색 침전물이 층을 형성하였다(Fig. 9C). 이 회백색 침전물들은 미관을 해치는 것은 물론 암석의 표면에 고착되어 풍화를 촉진시키고 있다. 또한 대기오염물질 등의 영향으로 암석 표면이 암갈색을 보이는 적화현상도 나타난다.

5.4. 생물학적 풍화

이 관측사 석불입상은 생물학적 오염이 가중되어 있으며 지의류에 의한 피해도 심각하다. Yun(2006)에 의

하면, 이 석불입상에서 습기가 다량 제공되는 부분과 그렇지 않은 부분에서의 생물 분포가 다르게 나타났으며 지의류뿐만 아니라 미세조류와 시아노세균 및 곰팡이 등이 서식하고 있는 것으로 알려졌다. 이 석불입상의 상반신은 지의류의 고사체에 의해 암석 표면이 전체적으로 암흑색 또는 흑갈색으로 변색되어 있다. 이들은 석불입상의 미관을 해치는 것은 물론 암석의 풍화도 촉진시키고 있다. 보개에서는 거의 전 부분에 걸쳐 황록색, 암녹색, 회색, 암회색 고착지의류가 서식하고 있다.

보관, 머리, 목 부분은 대체로 생물학적 훼손이 미약하나 얼굴의 여러 곳에 곤충의 서식 흔적이 존재하며 허리 부분의 앞면을 제외한 나머지 부분은 고착지의류에 의해 피복되어 있다. 하반신은 지의류의 고사체는 물론 현재 암석의 표면에 고착되어 기생하며 자생하고 있는 균류, 조류, 지의류 등이 나타난다. 이들은 청남색 또는 진홍색의 반점상으로 산출되고 있으며(Fig. 9D), 이 부위의 암석은 박리 현상과 함께 화학적 및 광물학적 풍화가 심하게 진행되어 있다.

부재의 결손 부위에는 초본식물이 자생하고 있어 식물체의 근압에 의한 암석의 풍화가 이루어지고 있다(Fig. 9E). 또한 황색 엽상지의류가 옷자락의 문양을 따라 집중적으로 분포하고 있는 것이 발견된다(Fig.

9F). 이 석불입상의 발 윗부분부터 무릎까지 전면과 좌측면에는 고착 및 엽상지의류가 번성하였고 우측면과 뒷면에는 고착지의류가 관찰된다. 특히 하대석 전면과 좌측면에는 고착 및 엽상지의류와 이끼류가 번성하여 석불입상의 손상을 촉진하고 있다.

기반암과 직접적으로 접촉되어 있는 콘크리트 충전 부위는 고여 있는 지하수와 지반에서 올라온 습기의 영향, 콘크리트가 제공하는 양분에 의해 다양한 지의류로 피복되어 있다. 또한 훼손된 모르타르에는 미세 조류와 시아노세균이 형성한 녹색의 층이 발견되며 우측에서는 부위에 따라 진균류와 세균이 합세하여 형성한 흑색의 층도 발견된다. 이는 암석의 물리적, 화학적 풍화를 발생시키는 원인을 제공하여 나아가 석불입상의 구조적 불안정을 유발시킬 수도 있을 것이다.

6. 고찰 및 제언

6.1. 석재의 산지추정

석조문화재 구성부재의 원산지 해석은 고고지질학 측면에서 석재의 채석과 이동 및 가공수법을 추정하는데 아주 중요한 단서를 제공한다(Attanasio *et al.*, 2005; William-Thorpe and Thorpe, 1993; Lee *et al.*, 2006a). 또한 손상된 석조문화재의 대체 및 보수재료를 조달하고 원형복원을 목표로 하는 보존수복의 원칙에도 필요한 연구이다.

그러나 대부분의 석조문화재에서는 시료를 구하기도 어렵고, 심각한 풍화작용을 받아 원암의 성질을 유지하고 있는 경우도 흔치 않다. 국내에서도 석조문화재의 구성부재에 대한 체계적인 산지추정 연구가 수행되고 있으나(Jwa *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2005; Cho and Jwa, 2005; Yang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2005d; 2006c), 아직은 초기 단계라 할 수 있다.

Lee *et al.*(2005d)은 관촉사 경내의 이 석불입상 전면에 있는 석등의 기원암에 대한 원산지 추정에서, 석등 부재는 산출상태와 암석학적 및 지구화학적 특성이 주변의 기반암과 동일한 성인을 갖는 화강섬록암으로 해석하였다. 따라서 석등의 제작 당시에 사용된 석재는 가까운 장소에서 자급자족하였을 가능성이 높을 것으로 보고하였다. 이 연구의 결과에서도 이 석불입상과 기반암은 암석학적으로 동일한 성인을 갖는 것으로 밝혀졌다. 그러나 현시점에서, 이 석불입상의 구성에 사용된 석재의 채석산지는 불분명하며 조성 및 치석수법과 석재의 공방에 관한 근거도 불충분하다.

6.2. 손상요인 및 제어방안

야외에 노출되어 있거나 관람객의 손질이 직접 미칠 수 있는 환경의 문화재들은 자연적 원인에 의한 훼손뿐만 아니라 인위적 훼손 또한 심각하다. 이 석불입상의 등에도 의도적인 훼손흔적이 있고, 기반암에도 인위적인 훼손이 가해져 있다. 이와 같은 현상은 이미 다른 석조문화재에서도 잘 알려져 있다(Lee and Lee, 2005; Kim *et al.*, 2006). 관촉사는 주변 상황으로 볼 때, 경제활동과 관련된 직접적인 훼손은 없었을 것으로 보인다. 그러나 풍화에 노출되어 오랜 세월을 지나는 동안 암석조직의 약화는 석불입상의 물리화학적 풍화를 촉진시켰을 것이다. 한편 관광객들이 발생시킨 미세 먼지는 바람에 의해 대기오염물질과 섞여 석불입상의 표면에 달라붙어 훼손을 촉진시킬 수 있다. 또한 인간의 접촉에 의한 물리적 손상도 드러나 있다.

이 석불입상은 막대한 하중에 의한 압축 및 전단 파괴의 우려가 있고, 실제로 이러한 현상은 절리 및 균열의 형태로 발견된다. 또한 균열 부위에 의도적으로 끼워 넣은 철심이나 철판도 화학적 훼손을 유발한다. 겨울에는 수분의 동결작용에 의한 물리적 풍화가 심할 것이다. 특히 보호각이 없이 노출되어 있기 때문에 바람과 산성강우, 강설에 의한 물리화학적 영향으로부터 피할 수 없다. 또한 조류의 배설물과 하등 및 고등식물에 의한 피해도 배제할 수 없는 상황이다.

이 석불입상의 보존을 위해서는 자연적 손상요인을 차단하기 위한 인공시설물의 설치가 필요하나, 이를 위해서는 세심한 타당성 검토가 수행되어야 할 것이다. 또한 석불입상의 일조시간 확보를 위해 남서쪽 수목을 정비하고, 기반암 뒤에서 흘러 내려오는 지하수의 출구를 봉쇄하거나 뚜렷한 수로를 확보해 주는 것이 시급하다. 한편 석불입상의 뒤에 병풍처럼 둘러있는 기반암에 대한 정밀진단과 안정화 방안도 검토되어야 한다.

전술한 바와 같이, 이 석불입상의 손상은 자연적 및 인위적 요인이 복합적으로 작용한 결과이다. 문화재는 원형보존이 최선이나, 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 다양한 방법에 의한 수리와 복원이 요구된다. 이 관촉사 석불입상도 손상부위에 대한 보존처리가 필요하다. 국내외에서 석조문화재의 부분적인 보존처리가 수행되고 있으며, 비교적 체계적이고 과학적인 실험과정을 통해 검증된 방법도 보고된 바 있다(Kim, 1993; Fidler, 2002; Lisci *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2003; 2005; Lee *et al.*, 2005c; Lee *et al.*, 2006d). 그러나 문화재의 직접적인 보존처리에 대한 많은 문제점이 노출되어 있다. 따라서 이 석불입상의 보존처리에는 풍

화원인과 부식 메카니즘 등에 대한 이해 및 임상실험과 검증에 거친 처리방법이 적용되어야 할 것이다.

7. 결 언

1. 논산 관촉사 석조미륵보살입상은 흑운모가 많은 중립 내지 조립질 화강섬록암으로서 암회색을 띠며, 미약한 편마상 구조 및 페그마타이트 세맥이 발달한다. 이 석불입상과 기반암의 전암대자를 측정치(6.61~15.7×10⁻³ SI unit) 및 지구화학적 분석결과, 두 암석은 분화과정이 서로 동일한 마그마로부터 형성된 것으로 나타났다.

2. 이 암석의 CIA는 기반암이 51.43, 석불입상이 50.86이며, WPI는 각각 4.52와 8.95로서 이들은 모두 풍화잠재력이 큰 것으로 판단된다. 이 석불입상은 열화 및 박리에 의한 물리적 풍화가 진행된 상태이고, 이차적인 오염물질과 침전물질이 산재해 있다. 기반암도 불연속면의 발달에 따른 지반붕괴의 위험성을 내포하고 있다.

3. 이 석불입상의 표면은 부분적으로 황갈색으로 변색되어 있고 회백색, 암회색 및 암흑색 침전물이 형성되어 있다. 또한 고착지의류의 피도가 심하고 균류, 조류, 선態류 및 고등식물 등도 발견된다. 이들은 주로 수분을 직접적으로 공급받는 곳이거나 수분증발이 원활하게 이루어지지 않는 부위에 집중되어 있다.

4. 이 석불입상의 손상은 자연적, 물리화학 및 생물학적 요인이 복합적으로 작용한 결과이다. 따라서 이 석불입상의 복합적 손상에 영향을 줄 수 있는 요인들을 제어하기 위한 주변 환경에 대한 정비가 시급하며 지의류에 의한 피복, 박리 및 균열로부터 석불입상을 보호하기 위한 체계적인 과학적 보존처리가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 국립문화재연구소 보존과학연구개발사업의 일환으로 진행 중인 “석조문화재 보존처리를 위한 손상평가기술 개발” 과제로 수행된 것임을 명기하며, 이에 감사한다. 또한 여러모로 미숙한 원고에 대한 심사와 건설적인 비평을 가해주신 한국지질자원연구원의 홍세선 박사님과 경북대학교의 장윤득 교수님께도 깊은 사의를 표한다.

참고문헌

- Ashurst, J. and Dimes, F.G. (2001) Conservation of building and decorative stone. Butterworth-Heinemann Publications, Oxford, p. 1-254.
- Attanasio, D., Platania, R. and Rocchi, P. (2005) The marble of the David of Michelangelo: a multi-method analysis of provenance. *Journal of Archaeological Science*, v. 32, p. 1369-1377.
- Boynton, W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In Henderson, P. (ed.), *Rare earth element geochemistry*, Elsevier, p. 63-107.
- Chang, T.W. and Hwang, J.H. (1980) Geological map and explanation of Nonsan Sheet (1:50,000). Korea Institute of Natural Resource and Development, p. 1-32.
- Cho, K.M. and Jwa, Y.J. (2005) Study on the source area of the stones from stone cultural properties -Geomorphological and petrological approach for the Iksan area. *Journal of Petrological Society of Korea*, v. 14, p. 24-37.
- Choi, S.E. (1992) Discussion of sculpture in area of the Baegje Kingdom -Focused on late Unified Shilla Kingdom to early Koryo dynasty. *Sculpture and Fine Art in Baegje Kingdom*, Kongju National University Museum, p. 211-226.
- Choi, S.J. (2000) A Studies on the stone Buddha in Gwan-choksa temple of Koryo dynasty. *Journal of Fine Art History in Korea*, v. 14, p. 3-34.
- Choi, S.W., Yun, Y.H., Suh, M.C., Kim, G.H. and Lee, C.H. (1999) Present state and preservation methods for stone cultural properties of the Chungnam Province. *Research Report of the Chungnam Province*, Korea, p. 1-425.
- 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.
- JGK(Japanese Government in Korea), (1916) Survey photographs of archaeological remains in Choseon 7. Reprinted in 1980, Gyeongin Publishing Co. Ltd.
- Jin, M.S., Lee, J.Y. and Ishihara, S. (2001) Granitoid and their magnetic susceptibility in South Korea. *Resource Geology*, v. 51, p. 189-203.
- Jwa, Y.J., Lee, S.W., Kim, J.S. and Sohn, D.W. (2000) Source area of stones used for the stone buildings of Bulguksa temple and Seokguram Grotto. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 36, p. 335-340.
- Kim, C.G., Lee, K.I. and Bae, G.M. (1999) Engineering properties and application of weathered granite and soil. Changwoo Publishing Co. Ltd., Korea, p. 19-30.
- Kim, L.N. (1985) A study on stone Buddha in Koryo dynasty. *Korean Journal of Archaeological Fine Arts*, v. 166-167, p. 57-82.
- Kim, S.D. (1999) Conservation of stone cultural properties. *Journal of Architectural History in Korea*, v. 8, p. 57-82.
- Kim, Y.T., Lee, C.H. and Lee, M.S. (2005) Deterioration assessment for conservation sciences of the five storied stone pagoda in the Jeongrimsaji temple site, Buyeo, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 38, p. 675-687.
- Lee, C.H., Choi, S.W., Lee, H.M. and Lee, M.S. (2006a)

- Archaeogeological implication of lithic artifacts from the Unjeonri Bronze Age site, Cheonan, Republic of Korea. *Journal of Archaeological Science*, v. 33, p. 335-348.
- 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, C.H., Chung, Y.S., Kim, J.Y. and Yi, J.E. (2005a) Behavior interpretation and secondary degradation of the standing sculptured Buddha at the Yongamsa temple, Ogcheon, Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 17, p. 83-94.
- Lee, C.H., Kim, S.D., Han, B.I., Kim, Y.T. and Lee, M.S. (2004) Conservation treatment and deterioration assessment of the sculptured standing Buddha named Taehwa 4 year in the Jincheon, Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 16, p. 39-51.
- Lee, C.H. and Lee, M.S. (2005) The state of the art and conservation method of the rock cultural heritages, Republic of Korea. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, v. 9, p. 13-21.
- Lee, C.H., Lee, M.S. and Suh, M. (2005b) Safety interpretations of the discontinuity and weathering characteristics of the Gaheungri triple Buddha statue, Yeongju, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 41, 401-413.
- Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W. (2005c) Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea. *Environmental Geology*, v. 47, p. 547-557.
- Lee, C.H. and Suh, M. (2002) Geological and petrological safety diagnosis of the multi-storied stone pagoda in the Daewonsa temple, Sancheong, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 35, p. 355-368.
- Lee, D.S., Lee, C.H. and Kim, J.Y. (2006b) Weathering impact for rock properties and material characteristics of concretes used stone pagoda of the Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 39, p. 285-299.
- Lee, M.S., Yi, J.E., Pyo, S.H., Song, C.Y. and Lee, C.H. (2005d) Deterioration diagnosis and petrogenesis for rock properties of the stone Lantern in the Gwanckoksa temple, Nonsan, Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 17, p. 5-18.
- Lee, M.S., Jeong, M.H., Jung, Y.D. and Lee, C.H. (2006c) Deterioration and conservation treatment of the three storied stone pagoda in Seokakri, Gyeongju, Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 18, p. 63-74.
- Lee, S.H. (1998) Geological discussion for conservation methods of stone cultural properties in Korea. *Journal of Conservation Science*, v. 7, p. 9-18.
- Lisci, M., Monte, M. and Pacini, E. (2003) Lichens and higher plants and stone: a review. *International Biodegradation and Biodegradation*, v. 51, p. 1-17.
- 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. *Geological Society of American Bulletin*, v. 65, p. 1007-1032.
- Nonsan City (2005) Nonsan in Chungnam Korea. Climate, <http://www.nonsan.chungnam.kr>.
- 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 basalt and mantle xenolith*, Shiva, p. 230-249.
- Uchida, E., Ogawa, Y., Maeda, V. and Nakagawa, T. (1999) Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia. *Engineering Geology*, v. 55, p. 101-112.
- William-Thorpe, O. and Thorpe, R.S. (1993) Geochemistry and trade of Eastern Mediterranean millstones from the Neolithic to Roman periods. *Journal of Archaeological Science*, v. 20, p. 263-320.
- Yang, H.J., Lee, C.H., Choi, S.W. and Lee, M.S. (2006) Petrological characteristics and provenance presumption for rock properties of the stone pagoda in Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 42, p. 293-306.
- Yun, Y.G. (2006) Biological distribution on the surface of stone Buddha in Gwanckoksa temple, Korea. *Proceeding Paper of the 23th Annual Meeting of the Korea Society of Conservation Science*, p. 78-83.