

영주 가흥리 마애삼존불의 암석학적 분석과 안전 진단

이명성* · 이찬희* · 서만철** · 최석원**

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 지질환경과학과

Safety Diagnosis and Petrological Analysis of Gaheungri Sculptured Standing Triple Buddha in Youngju

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

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

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

1. 서론

경북 영주시 가흥동 264-2번지에 위치한 영주 가흥리 마애삼존불상은 보물 제221호 (1963년 1월 21일)로 지정된 통일신라시대의 석조문화재이다. 이 삼존불상은 영주시내 서쪽에서 남북으로 발달된 서천의 대로변에 노출된 흑운모 화강섬록암의 노두 남동면에 선각된 마애불로서 중앙에는 3.3 m 높이의 좌상 본존불을 조각하고 좌우로 입상의 협시불을 새겨 넣었다. 이 삼존불의 서쪽 하단부에는 삼존불과 동일한 암석내에 선사시대의 암각화(시도유형문화재 248호)가 음각으로 새겨져 있어 더욱 주목받고 있다.

영주 가흥리 마애삼존불상이 조각된 암반은 수십 개의 암괴로 분리되어 있으며, 삼존불상의 양측과 하부의 암괴는 수직절리와 수평절리가 발달하고 있어 기계적, 화학적 및 생물학적 풍화를 받기 쉬운 곳에 노출되어 있다. 전체적으로 기반암에는 불연속면이 많아 구조적 안정에도 많은 문제를 야기하고 있다. 또한 지난 2003년 6월 28일 집중호우로 마애삼존불상 좌측 앞부분의 암벽 일부가 무너지면서 새로운 석불좌상이 발견되기도 하였다.

이 연구에서는 영주 가흥리 마애삼존불상을 중심으로 화강암류의 균열에 영향을 미치는 환경요인과, 풍화대 형성, 풍화의 진행에 따른 주성분원소의 지구화학적 특성과 거동, 절리 조도의 발달과정, 응력의 발생에 따른 암반사면의 안정성을 검토하였다. 이 결과는 영주 가흥리 마애삼존불상을 이루고 있는 화강암류의 기계적, 화학적, 광물학적 및 물리적 마모와 생물학적 훼손에 영향을 미치는 풍화요소를 규명할 수 있을 것이며, 이를 정량화하여 보존 연구를 위한 자료로 활용할 것이다.

2. 지질 및 암석학적 특징

2.1. 지형과 지질

이 마애삼존불상이 위치한 영주시의 지형은 북동에서 남서방향으로 발달하고 있는 소백산맥에서 분기된 남북방향의 용암산-집봉-주마산을 잇는 능선과 동북방향으로 영지산-불노봉-갈미봉으로 연결된 산계에 의해 지배되어 있다. 구릉은 주로 흑운모 화강암의 분포지역으로 남서방향으로 발달하고 있다. 소백산맥에서 발원하여 사행하면서 남류하는 죽계천은 연구지역인 영주시에서 남동류하는 남원천과 합류하여 내성천에 유입된다. 삼존불상은 가흥동에서 남원천이 내려다보이는 기반암의 남동사면에 있다. 마애불상을 중심으로 좌우측에는 인가와 경작지가 있어 약간 돌출한 지형을 이루고 있다. 기반암 주변의 약 10 m 반경 내에는 본존불과 동일한 암종의 크고 작은 암괴들이 노출되어 있다.

영주시 일대의 기반암은 선캠브리아기의 변성퇴적암류로서 주로 호상편마암, 안구상편마암, 석회규산염암 및 흑운모편암 등으로 구성되어 있다. 이를 시대미상의 흑운모 화강암류가 관입하고 있다. 흑운모 화강암류 내에는 규모에는 차이가 있지만 많은 페그마타이트들이 발달하고 있으며, 이들은 암쇄대나 전단 절리에 의하여 절단, 변위되어 있기도 한다. 연구지역의 흑운모 화강암류는 유색광물의 함유량과 편마상구조의 강도 및 조직에 따라서 반상 편마상 화강암과 흑운모 화강암으로 구분할 수도 있으나 이들은 서로 점이적으로 변화한다. 흑운모 화강암류는 변성퇴적암류와 관입 접촉부에서 심한 편마상구조나 압쇄구조를 보여준다. 또한 제4기의 충적층이 이를 부정합으로 덮으면서 하상과 평야지대를 형성하였다.

2.2. 암석학적 특징

연구지역의 화강암류는 중생대의 편마상 화강암과 시대미상의 흑운모 화강암, 반상 편마상 화강암 및 세립질 복운모 화강암으로 구성되어 있다. 삼존불상이 조각되어 있는 암석은 중립의 흑운모 화강섬록암이지만 부분적으로 반정(석영과 사장석)과 페그마타이트 세맥(폭 5~10 cm)이 보이는 곳도 있다. 암색은 암회색이나 풍화면은 보통 담갈색을 띤다. 이 암석은 영주도폭 지질도에서 시대미상의 흑운모 화강암으로 표기되어 있으나, 암석 및 광물학적 연구결과에 따르면 흑운모 화강섬록암으로 기재하였다.

삼존불상을 이루는 흑운모 화강섬록암의 조암광물들은 석영, 사장석, 미사장석 및 흑운모 등이며 백운모, 녹염석, 저어콘 및 인회석이 부성분광물로 산출된다. 전체적으로 편리의 발달이 미약한 등립조직을 보여 준다. 현미경하에서는 세리에이트 조직을 보이는 석영과 퍼사이트화된 장석이 주류를 이루고 있으며 석영은 풍화에 의해 미세한 균열이 발달되어 있다. 격자상 쌍정을 보여주는 미사장석은 퍼사이트화되어 있으며 흑운모는 입자경계나 벽개면을

따라 녹니석화 되어 있다. 또한 콘크리트와 시멘트 몰탈로 수리된 부분에서는 방해석과 돌로마이트가 검출되었으며, 절리면에서 수습된 시료에서는 스�멕타이트와 녹니석 등의 점토광물들이 검출되었다. 삼존불상과 기반암은 불연속면으로 완전히 분리되어 있으나 산출상태와 조직 및 조암광물이 서로 동일한 암석이다.

전암 대자율 값의 범위는 $0.02\sim 0.20(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 정도로 전체적으로 낮은 값을 가진다. 이를 세분하면 가흥리 삼존불의 대자율값은 $0.02\sim 0.20$ (평균 0.12)이며, 기반암은 $0.04\sim 0.13$ (평균 0.09)로서 서로 동일한 분화과정을 경험한 동일 종류의 암석으로 해석할 수 있다. 이 암석은 대자율 측정값으로 보아 티탄철석에 속한다. 이는 화강섬록암체의 분화 말기 암상이며, 자철석을 거의 포함하지 않는 암석임을 보여주는 것이다. 분화 말기의 암상에서 대자율값의 현저한 감소 경우는 경상분지 화강암 연구에서 보고된 바 있는데, 자철석 분별의 결과로 해석하였다.

3. 풍화 및 훼손상태와 안정성

3.1. 기계적 풍화와 구조적 불안정

이 마애삼존불상은 불상 자체의 풍화훼손 및 절리에 의한 위험 보다는 주변 암반의 붕괴 가능성이 심각한 위험에 처해있다. 이 삼존불상이 조각되어 있는 암반에는 주로 두 방향의 주향(N50~80°E, N10~30°W)과 수직, 수평 및 저경사를 갖는 절리계가 발달한다. 이 절리들을 살펴보면 우협시불의 측면에서 주위 암반을 수직으로 절단하는 불연속면이 발달하여 있고, 본존불의 전면에는 다른 기반암과 완전히 분리된 V자형의 절리가 노출되어 있다. 또한 삼존불상의 배면 암반에는 수직절리가 관찰되는데 경사가 마애불상을 향하고 있다. 본존불과 좌협시불에는 수직 및 수평절리가 발달되어 있으며 암석의 표면산화, 박리 및 박락이 진행중이다. 삼존불상 모두 코와 눈 근처에 인위적인 상흔이 남아 있으며 수인의 일부가 탈락되어 있다. 이와 같이 이 삼존불상 주변에는 크고 작은 불연속면이 중첩되어 있어 각 암괴의 전방도괴 가능성이 아주 높은 것으로 보인다.

이 삼존불상의 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 응력의 방향을 해석하고자 평사투영도와 로즈 다이어그램에 투영하였다. 대부분의 절리계는 N50~80°E와 N10~30°W의 주향과 수직, 수평 및 저경사를 갖는 다양한 절리계가 발달한다. 이 두방향의 절리계는 사교하는 암반은 기계적 파괴와 붕괴의 원인이 된다. 또한 경사가 수직에 가까운 판상절리가 삼존불상 전방아래의 암반에 집중되어 있어 붕괴시 기반암과 떨어져 있는 삼존불상에 커다란 영향을 줄 것이다. 이 절리대에는 잡초와 암석의 파편이 산재하고 있어 우기에 강수의 통로가 되어 화학적 풍화를 가속시키는 결과를 초래할 것이며, 겨울에는 결빙과

음해가 반복되면서 쇄기작용에 의한 암석의 파괴가 발생할 것이다.

3.2. 산출상태와 암반의 안정성

2003년 6월 28일자 중앙일보에 따르면, 가흥동 남쪽 산끝에 있는 마애삼존불상 좌측 앞부분의 암벽 일부가 집중호우로 무너지면서 새로운 석불이 발견되었다. 이 불상은 자연 암반에 새긴 마애여래좌상으로 높이는 약 1.9 m이며 광배와 연화대가 새겨져 있고 눈, 코가 훼손된 것을 제외하곤 완전한 형태이다. 현재에는 마애삼존불상의 왼쪽 아래의 새겨져 있는 암각화 앞에 철책을 세워 보호하고 있으며, 차후에 보존대책을 수립하고 무너진 암벽을 원상복구한 후 불상을 원래 있던 장소로 다시 옮길 예정이다.

붕괴 후에도 마애삼존불상상의 주변 암반내에는 크고 작은 절리계가 거동할 것으로 예측된다. 불연속면의 존재유무는 암반사면의 안정성에 매우 중요한 영향을 미치며, 이러한 지질학적 특징들을 알아내는 것은 안정성 연구의 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 삼존불상의 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 DOS용 프로그램인 DIPS로 평사투영법(stereographic method)에 의한 평면파괴, 썩기파괴, 전도파괴 안정성 검토하였다.

평면파괴는 중력의 작용에 의해 암괴가 평면 활동을 일으키는 경우 단일면상의 암괴는 취약면의 경사 방향에 평행하게 이동하는 것이다. 암반사면에서 비교적 드물게 발생하는 것으로서, 질서정연한 지질구조를 갖는 암반에서의 파괴유형으로 파괴면의 경사각이 사면의 경사각보다 작아야하고 파괴면의 마찰각보다 더 커야 한다. 썩기파괴는 두 불연속면이 경사면을 비스듬히 가로질러 존재하고 그 교선이 경사면에 드러나 있을 때, 이 교선의 경사가 마찰각보다 상당히 클 경우 이들 불연속면 위에 놓여 있는 썩기형 암반은 교선을 따라 아래로 미끄러지는 것이다. 전도파괴는 암주나 암석 블록들이 고정된 기준점에 대해 회전하며 파괴되는 현상이다.

이 삼존불상이 조각되어 있는 암반의 사면방향은 주향이 N60°E, 경사가 70°SE이다. 마찰각은 Rock Slope Engineering에서 화강암 기본마찰각의 개략적인 값인 33°를 이용하였다. 이 결과 대부분의 절리계는 마찰각보다는 크고 사면의 경사각보다는 작은 초승달 모양의 영역이 되는데, 이 영역 중 사면의 주향과 $\pm 20^\circ$ 되는 영역이 파괴가 가능한 장소이다. 그러나 이 안에 도시되는 불연속면이 없으므로 평면파괴의 가능성은 없는 것으로 판단된다. 썩기파괴의 가능성을 살펴보면 사면의 경사각보다는 작고 마찰각보다는 큰 영역인 길쭉한 초승달 모양의 영역이 파괴가 일어날 영역이다. 이 영역에 불연속면이 교차할 때 썩기파괴의 가능성이 있다. 이 암반에는 두 방향의 절리군 중에 N10~30°W의 주향을 갖는 불연속면들이 파괴영역 안에서 교차함으로써 썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

3.3. 광물 및 화학적 풍화

이 삼존불상 주변에 탈락되어 있는 암석 중에 석불과 동일한 상태의 암종을 선택하여 주 성분 원소를 분석하였다. 각각의 주성분원소 조성은 약간의 차이가 있으나 영주 화강섬록암에 비하여 Fe_2O_3 와 MgO 는 부화되어 있으며 CaO 는 결핍되어 있다. 그 이외의 대부분의 원소들은 일정한 값을 갖는다. 각각의 조성을 일반적인 화강암의 평균 함량으로 표준화하면, 결핍된 Na_2O , K_2O 및 P_2O_5 를 제외한 대부분의 원소가 부화되어 있으며 SiO_2 와 MnO 는 일정한 값을 갖는다. 이는 암석의 풍화작용에 의한 소실효과와 사장석, 정장석 및 흑운모가 풍화에 따라 점토광물과 산화철 광물로 변질되면서 증가한 원소가 있기 때문으로 해석된다. 모든 원소의 변화양상이 동일한 것으로 보아 동일한 분화과정을 경험한 암석임을 보여준다.

화강암의 풍화에 의한 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 화학적 풍화지수(CIA)를 구할 수 있다. 삼존불상을 이루는 암석의 CIA는 51.66~63.96으로서, 일부를 제외하고는 현재 암석의 화학적 풍화작용이 왕성하게 발생하는 정도는 아니다. 삼존불상을 이루는 암석을 편광현미경으로 관찰하면, 대부분의 장석류는 견운모와 점토광물광로 변질되어 있음을 보여준다. 흑운모도 입자경계나 벽개면을 따라 녹니석, 녹염석 및 철 수산화 광물로 교대된 것을 볼 수 있다.

이를 주사전자현미경에서 보면 장석들은 용식에 의하여 많은 공극이 발달된 것을 볼 수 있고, 공극과 입간에는 이차적으로 생성된 견운모와 같은 점토광물을 관찰할 수 있다. 대부분의 석영과 장석의 입자경계에서 장석의 풍화에 따라 생성된 고령석이 결정면을 피복하고 있다. 흑운모는 입자의 경계를 따라 녹니석으로 변질되어 있다. 또한 삼존불상의 표면을 부식시키고 있는 하등식물(지의류 또는 조류)의 뿌리조직과 석영 또는 사장석의 경계에서는 고령석과 지의류의 뿌리와 균사체로 보이는 유기물이 뒤엉켜 산출된다. 이 광물들의 대부분은 현미경하에서 관찰되는 미세열극을 따라 생성되어 부피를 팽창시키고, 규산과 물을 흡수하거나 용출시켜 광물의 이차반응을 촉진시키는 용매역할을 한다.

3.4. 생물학적 풍화

영주 가흥리 마애삼존불상을 이루는 암반은 생물학적 오염이 가중되어 있으며, 특히 토양화된 절리면에 잡목과 잡초가 서식하고 있어 피해가 심각하다. 또한 지의류, 선태류나 균류들은 암석을 육안관찰이 어려울 정도로 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색 또는 진녹색의 반점상으로 산출된다. 지의류에 따른 삼존불상의 피도를 보면 거의 90% 이상을 보인다. 기반암에서도 부분적으로 담록색, 암흑색 또는 황갈색을 띠는 지의류가 피복되어 있다. 직사광선을 받기 어려운 일부를 제외하고는 전체적으로 약 2 cm 정도의 깊이까지 포자근과 균사에 영향을 받은 것으로 나타났다. 또한 삼존불상 연화좌 아래의 절리면에는 잡초

와 고등식물들이 서식하고 있어 식물체에 의한 기계적 풍화를 가속시키고 있다.

삼존불상을 이루는 화강섬록암에서 관찰되는 유기물은 화강암의 표면으로부터 1.5 cm 깊이의 시료에도 조암광물의 공극에서는 2~3 μm 정도의 두께를 갖는 지의류의 포자근과 균사(Crustose lichen's rhizoid)가 서로 엉켜있다. 또한 표면에서 약 2 cm 깊이의 암석내부에서도 조암광물의 공극과 입자경계는 섬유 또는 다발상태로 산출된다. 또한 석영과 장석의 입간공극을 침투한 지의류의 포자근과 균사, 이차적으로 생성된 점토광물과 결합되어 조암광물의 입간을 충전하는 등, 아주 다양한 형태의 생물학적 풍화현상을 관찰할 수 있다.

4. 결론

1. 영주 가흥리 마애삼존불상의 구성암석은 부분적으로 반정이 있는 중립질 흑운모 화강섬록암이다. 전암 대자율의 범위는 $0.02\sim 0.20(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 정도로 낮은 값을 갖는 것으로 보아 티탄철석 계열에 속한다. 조암광물 중에 장석류와 흑운모는 입자경계와 벽개면을 따라 점토광물과 철수산화 광물로 변질되어 있다.

2. 기반암에는 두 방향의 주향(N50~80°E, N10~30°W)과 수직, 수평 및 저경사를 갖는 절리계와 이를 사교하는 크고 작은 절리계가 발달되어 있어 암반의 구조적 불안정을 초래하였다. 삼존불상 전면의 암반에 V자형 절리가 발달하고 있어 전방도괴의 우려도 있다.

3. 삼존불 배면의 암반에는 수평절리가 발달하며 경사는 삼존불상을 향하고 있다. 본존불과 좌우협시불에는 수직 및 수평절리가 발달하며 두상과 손에는 박리, 박락 등 인위적인 상흔이 노출되어 있다. 삼존불상과 기반암은 완전히 분리되어 있으나 암석학적으로는 동일한 암석이다. 이 암반의 구조적 안정성 검토 결과, 각 암괴의 썩기과괴 가능성이 높을 것으로 나타났다.

4. 삼존불상을 이루는 화강섬록암은 동일종류의 암석에 비해 Fe_2O_3 와 MgO 는 부화되어 있으며 CaO 는 결핍되어 있다. 또한 일반적인 화강섬록암에 비해 K_2O 와 Na_2O 를 제외한 대부분의 원소가 부화되어 있으며 SiO_2 와 MnO 는 일정한 값을 갖는다. 이는 풍화작용에 의한 소실효과와 장석류 및 흑운모가 점토광물과 산화철 광물로 변질되면서 증가한 원소가 있기 때문으로 해석된다.

5. 삼존불상 및 주변에 분포하는 암석의 표면과 공극에는 이차적인 풍화산물인 점토광물, 표면을 부식시키고 있는 하등식물의 뿌리조직과 지의류의 균사체로 보이는 유기물이 관찰된다. 절리대는 토양화의 진행에 의하여 잡초와 수근이 암석의 기계적 풍화작용을 가중시키고 있다. 따라서 생물학적 훼손과 불연속면에 서식하는 식생을 제거하기 위한 생화학적 처리도 필요하다.

6. 삼존불상의 구조적 안정을 위한 지반공학적 보강방법과 배수로의 설치가 강구되어야 할 것이다. 균열이 심한 본체에는 암석용 충전제를 사용하여 경화처리가 선행되어야 할 것으로 보이며, 삼존불의 풍화와 구조적 불안을 야기하는 강수와 습도를 저감하기 위한 보호각의 설치도 고려되어야 할 것이다.

7. 삼존불상의 박리와 훼손 및 기계적, 생물학적 풍화로 인한 석재의 과학적 보존처리가 필요하며, 삼존불상의 풍화요소와 주변 환경변화에 대한 장기적인 모니터링과 함께 풍화요소를 저감할 수 있는 관리시스템을 구축해야 할 것이다.