

서산 마에삼존불의 풍화훼손도 및 불연속면의 거동특성

이선명*·이명성**·이병용**·이찬희*·최석원**

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 지질환경과학과

Deterioration and Behavior of Discontinuity System of the Seosan Standing Sculptured Triple Buddha Statue, Korea

Sun Myung Lee*, Myeong Seong Lee**, Byeong Yong Lee**,
Chan Hee Lee* and Seok Won Choi**

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

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

1. 서 론

서산마에삼존불상은 국보 제84호로, 충남 서산시 운산면 용현리에 위치하며 자연 암반에 선각되어 있는 백제를 대표하는 석조문화재이다. 현재 삼존불이 조각된 암반은 수십 개의 암괴로 분리되어 있으며 보호각 양측과 상부의 암괴에는 불연속면이 발달되어 있어 삼존불의 구조적 안정을 위협하고 있다. 또한 삼존불상은 전면에 걸쳐 발달된 불연속면에 발생하는 강수의 침입에 의한 침수대 형성, 암석의 용해로 인한 변색, 표면의 결로현상, 오염물 피복에 의하여 심하게 훼손되어 있다.

따라서 이 연구에서는 이 삼존불을 대상으로 구성암석의 산출상태, 암석학적 특성을 연구하고 풍화 및 훼손상태를 종합적으로 진단하였다. 또한 삼존불이 조각된 암반사면의 불연속면에 대한 방향성을 측정하여 구조적 안정성을 검토하였다. 이 연구는 석조문화재에 발생하는 불연속면의 거동특성을 명확히 해석하여 구조적 안정성을 평가하고 보존방안을 마련하는데 중요한 자료가 될 것이다.

2. 현황 및 연구방법

서산마애삼존불상은 가야산 북쪽 자락 해발고도 125m의 능선 하단에 있는 10m가 넘는 거대한 암벽의 남동면을 깎아 중앙에 본존인 여래입상(2.8m)과 본존의 오른쪽으로 보살입상(1.7m), 왼쪽으로 반가사유상(1.66m)을 조각하였다(그림 1A, 1B). 이 삼존불이 조각된 암반에는 불규칙한 불연속면이 발달되어 있으며 주변은 수목이 울창하여 항상 음습한 상태이다.

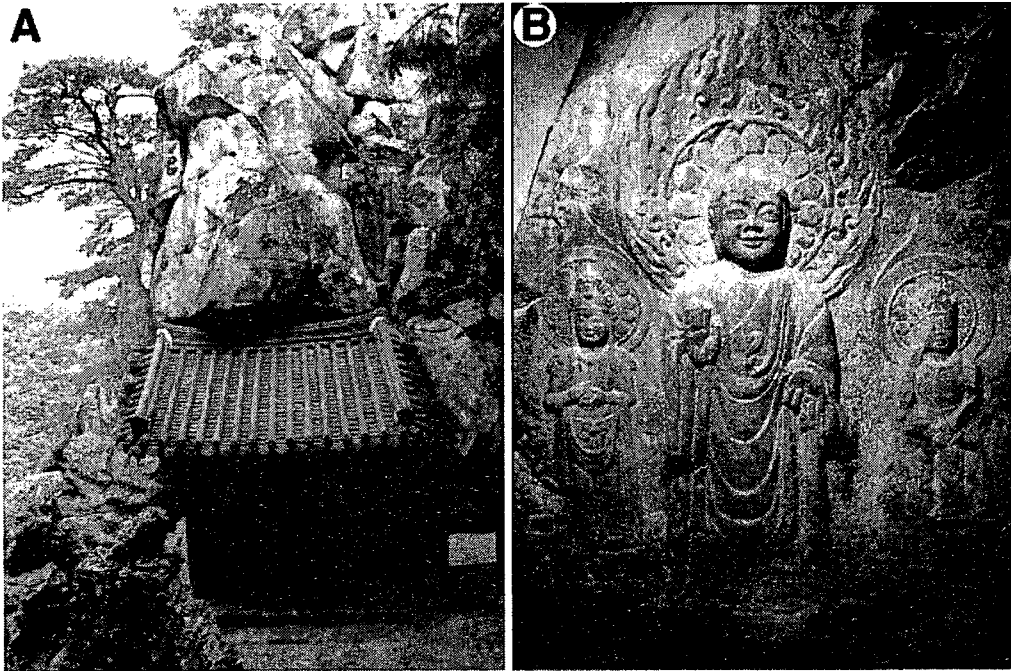


그림 1. 서산마애삼존불상의 현황. (A) 불연속면이 불규칙하게 발달된 암벽의 하단에 위치하며 아주 협소한 보호각의 내부에 있다. (B) 삼존불상은 중앙 본존불인 여래입상, 좌협시불인 반가사유상, 우협시불인 보살입상으로 이뤄져 있다.

이 연구에서는 삼존불상 주변의 지형 및 지질조사가 실시되었으며 삼존불상과 불상이 조각된 기반암의 암석학적 특성, 기계적, 화학적, 생물학적 풍화특성에 관한 정밀조사 및 주변 암반의 전암대자율 측정이 수행되었다. 또한 기반암의 불연속면을 대상으로 절리계의 주향과 경사를 측정하여 구조적 안정성을 평가하였고, 삼존불상의 기반암과 주변 기반암을 대상으로 암석학적, 광물학적 및 생물학적 분석을 위한 시료

를 채취하였다.

채취시료에 대해서는 반정량적인 광물조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성 등을 관찰하기 위하여 편광현미경과 주사전자현미경을 사용하였다. 또한 일부 시료에 대해서 X-선 회절분석, 주성분, 미량 및 희토류 원소에 관한 정량분석을 실시하였다. 또한 이 삼존불상의 기반암에 발달한 절리면의 구조적 안정성을 평가하고자 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 DIPS 프로그램을 이용하여 사면의 안정성을 검토하였다.

3. 풍화훼손도 및 암반의 거동특성

3.1. 풍화훼손도 진단

서산마애삼존불상을 구성하고 있는 암석은 중립질 흑운모화강암으로서 주성분 광물은 반자형 내지 타형의 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모 등이다. 또한 풍화에 따라 장석류와 흑운모의 입자경계와 벽개면에는 견운모, 백운모, 점토광물, 불투명 광물 및 철산화광물들이 관찰된다. 이 삼존불상을 대상으로 전암대자율을 측정한 결과, $0.02 \sim 0.16 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 범위를 나타내며 평균 $0.08 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 티탄철석 계열의 흑운모 화강암임을 지시한다.

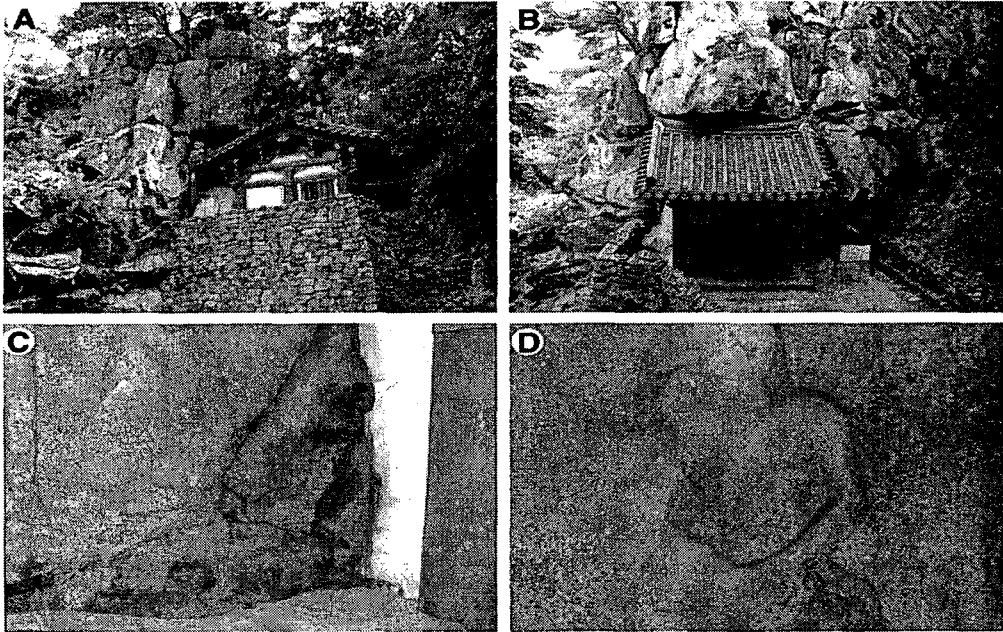


그림 2. 서산마애삼존불상의 기계적 풍화와 훼손상태 (A) 삼존불 주변 식생이 분포된 환경, (B) 보호각 상부와 양측에 발달된 절리 발달(C) 삼존불상 전면 하단으로 NW의 주향을 갖는 절리면이 발달하였으며 균열과 절리대를 따라 흘러들어 온 강수에 의해 형성된 침수대, (D) 삼존불상 좌협시불 팔 부분 파손.

서산마애삼존불상 주변의 지형은 산세가 험할 뿐만 아니라 각종 수목이 우거지고 습도가 높은 토양이라 풍화를 가속 시킬 수 있는 환경이다(그림 2A). 삼존불상이 조각된 암반은 수 십 개의 작은 암괴로 분리되어 있으며 보호각 상부와 양측으로 수직 절리와 수평절리들이 발달하고 있다(그림 2B). 삼존불의 좌협시불(반가사유상) 측면에는 주변 암반의 절리가 연장되어 삼존불상 전면 하단으로 NW의 주향을 갖는 절리면이 발달되어 있다.

이와 같은 암반 상부의 강수가 절리대를 따라 흘러 내려와 침수대를 형성하며 균열과 절리를 따라 박락이 발생하고 있다(그림 2C). 또한 삼존불상은 좌협시불(반가사유상)의 팔 부분뿐만 아니라 전면에 걸쳐 부분적으로 파손되어 있다(그림 2D). 전면의 곳곳에서는 결로현상이 보이며 미세한 절리 대를 따라 흐르는 강수와 보호각 내부 습기에 의해 광물 내 적철석, 갈철석등의 철성분의 용해로 인한 변색이 심하다. 또한 삼존불 상부의 시멘트와 물이 반응하여 용식된 회백색 침전물이 삼존불 전면으로 흘러 내리며 특히 우측면의 피해가 크다.

이 삼존불상을 이루는 기반암은 생물학적 오염이 가중되어 있으며 특히 침엽수나

활엽수의 수근에 의한 피해가 심각하다. 일부 토양화된 절리면에서 성장한 수근은 암석의 기계적 파괴를 촉진하고 있다. 또한 균류, 조류, 지의류나 선대류들은 암석의 표면에 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색, 진녹색의 반점상으로 산출된다. 삼존불상에서 탈락된 암편을 주사전자현미경으로 관찰한 결과, 삼존불상의 암석에서는 이차적인 풍화산물인 점토광물, 고령석, 전운모 그리고 균류와 지의류의 모근과 포자가 표면에 고착되어 있었다. 이는 암석 내부까지 풍화가 진행된 것으로 불연속면에 서식하는 식생에 대한 제거방안이 모색되어야 할 것이다.

3.2. 불연속면의 거동특성

삼존불상이 조각되어 있는 기반암에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하고 이를 개인용 컴퓨터 프로그램인 DIPS를 이용하여 암반의 응력방향을 해석하고자 평사투영도와 로즈 다이어그램에 도시하였다. 이를 통해 삼존불상이 조각된 암반사면에는 주로 세 방향의 주향(N30~50°W, N30~40°E, N80~90°E)과 수직, 수평 및 저경사를 갖는 다양한 절리계가 발달함을 알 수 있다(그림 3A, 3B). 이들이 서로 사교하여 불안정한 암괴를 형성하고 있다.

또한 삼존불상이 조각된 전면방향(S40E), 주향(N50E), 경사각(70SE)을 바탕으로 기반암에 발달한 절리의 주향경사 측정값들을 입력하여 평사투영법에 의한 평면파괴, 전도파괴, 썩기파괴에 대한 안정성을 검토하였다(그림 3C, 3D, 3E). 이 결과, 서산마에 삼존불상은 전도파괴에 대한 가능성은 보이지 않았으나 평면파괴와 썩기파괴에 대한 가능성이 예측되었다. 따라서 이 삼존불은 구조적으로 불안정한 사면에 노출되어 있는 것으로 해석할 수 있다.

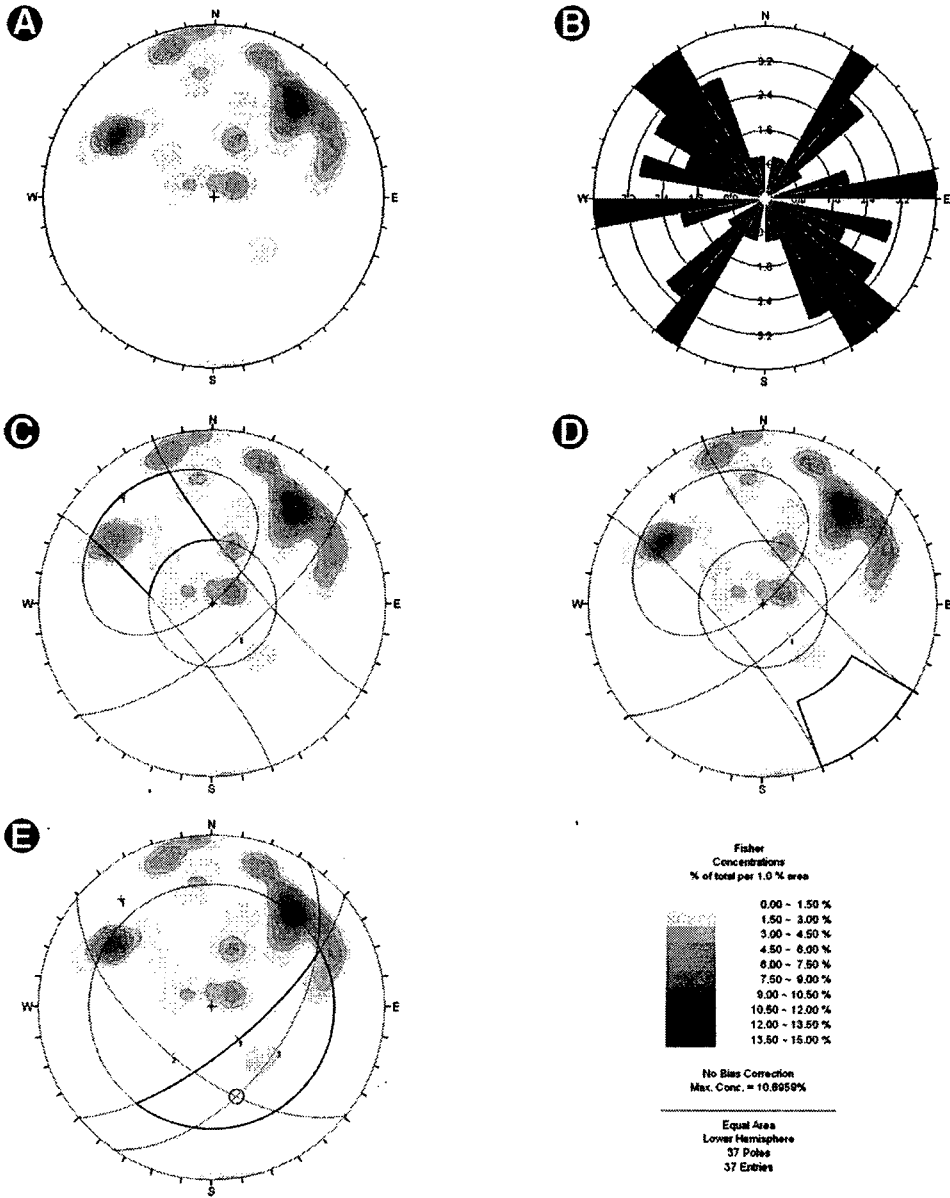


그림 3. 서산마애삼존불상의 기반암에 발달된 불연속면의 거동특성 해석. (A) 평사투영도. (B) 로즈 다이어그램. (C) 평면파괴, (D) 전도파괴 및 (E) 쉼기파괴의 가능성 영역에 도신된 불연속면의 주향과 경사.

4. 결 론

1. 서산마애삼존불상을 구성하고 있는 암석은 중립질 흑운모화강암으로서 주성분 광물은 반자형 내지 타형의 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모 등이다. 또한 풍화에 따라 장석류와 흑운모의 입자경계와 벽개면에는 건운모, 점토광물, 불투명광물 및 철산화광물들이 관찰된다.

2. 이 삼존불상의 기반암은 수십 개의 암괴로 분리되어 있고 기계적인 풍화작용에 따른 수직절리와 수평절리가 발달되어 있다. 이 암반사면에 발달한 미세 절리에 따른 강수의 이동으로 결로, 암석의 용해에 따른 변색, 오염물 침전과 같은 훼손양상이 심각하게 나타난다.

3. 이 삼존불상은 주변의 수목환경과 폐쇄형 보호각에 의해 구성암석의 화학적, 생물학적 풍화 및 훼손이 진행된 상태지만 기계적 풍화 및 구조적인 불안정성에 대한 피해가 더욱 크다.

4. 이 삼존불상을 이루는 기반암에는 세 방향의 주향 (N30~50°W, N30~40°E, N80~90°E)과 수직, 수평 및 저 경사를 갖는 다양한 절리계가 발달되어 있다. 이 절리들은 30여개의 불연속면으로 삼존불상의 구조적 안정성을 위협하고 있다.

5. 이 절리계를 평사투영법에 의해 기하학적으로 작도한 결과, 전도파괴에 대한 가능성은 보이지 않으나, 평면파괴와 쉐기파괴의 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이는 서산마애삼존불상이 불안정한 사면에 노출되어 있다는 것을 입증하는 자료로서 부분적인 붕괴의 가능성 까지도 있을 것으로 해석된다.