

서산 마애삼존불상의 훼손상태 및 불연속면의 거동특성

이선명 | 이찬희¹ | 최석원* | 윤석봉*

공주대학교 문화재보존학과

*공주대학교 지질환경과학과

Deterioration State and Behavior of Discontinuity System of the Seosan Maaesamjonbulsang (Rock-carved Triad Buddha in Seosan), Korea

Lee Sun-Myung | Lee Chan-Hee¹ | Choi Seok-Won* | Yun Seok-Bong*

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

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

¹Corresponding Author : 041-850-8543, chanlee@kongju.ac.kr

초록 서산 마애삼존불상을 구성하는 암석은 중립질 흑운모 화강암이다. 이 삼존불은 전면에 걸쳐 절리 및 균열과 탈락, 박리박락, 표면의 결로현상 및 이차적 오염물에 의한 변색 등으로 심하게 손상된 상태이다. 이 삼존불이 조각된 암반은 다양한 형태를 갖는 수십 개의 암괴로 분리되어 있으며, 불규칙한 불연속면이 발달되어 있다. 또한 주변의 암반에는 식생이 밀집되어 습도가 높고 미생물의 오염이 가중된 상태이다. 이 암반의 구조적 안정성 검토결과, 암반에 발달한 불연속면들은 불안정한 사면 환경에 노출된 상태로서 삼존불의 구조적 안정성을 위협하고 있는 것으로 해석되었다. 따라서 암반을 포함한 주변의 식생환경에 관한 정비가 필요하며 지속적인 모니터링을 통해 보다 정밀한 암반의 거동특성을 규명해야 할 것이다.

중심어 : 흑운모 화강암, 결로, 이차적 오염물, 불연속면

ABSTRACT Rock property of the Seosan Maaesamjonbulsang is composed of biotite granite with medium grained texture. The triad Buddha is highly deteriorated by the joint, fracture, break-out, exfoliation, dew condensation of the surface and discoloration of the secondary pollutant. Host rock of the triad Buddha is divided dozens of rock blocks with various shape, and developed irregular discontinuity planes. Besides, the host rock is promoted biological pollution due to the surrounding crowded vegetation and high humidity environment. As the results of structural stability, it is confirmed that developed discontinuity system in the host rock is exposed instability sloping environment. Therefore, the host rock and surroundings are required maintenance, and required preservation by continuance monitoring for understand behavior of discontinuity system.

Key word : biotite granite, dew condensation, secondary pollutant, discontinuity

1. 서론

서산 마애삼존불상은 국보 제84호로서 가야산 계곡의 층암절벽에 조각된 백제의 대표적 불상이다. 현재 삼존불이 조각된 암반은 다양한 형태를 갖는 수십 개의 암괴로 분리되어 있으며, 삼존불을 비롯한 암반 전체에 불규칙한 불연속면이 발달되어 있어 구조적 안정성을 위협하고 있다. 또한 삼존불은 물리적 및 화학적 풍화의 복합작용으로 절리 및 균열과 탈락, 박리박락, 표면의 결로현상, 오염물 피복의 심각한 훼손상태를 보인다.

석조문화재를 구성하는 암석의 풍화 및 훼손은 근본적으로 온도변화와 물-암석 반응의 영향을 받으며, 이로 인해 생성된 풍화잔류물이 결정화되면서 부피가 팽창하여 물리적 및 화학적 풍화를 진전시킨다.^{1,2} 이와 같은 풍화과정에서 생성되는 무기산과 공극은 조류, 지의류, 선대류와 같은 하등식물을 시작으로 고등식물의 서식처를 제공하게 되고 이들의 성장에 따라 기계적 풍화작용은 가속된다.^{3,4} 석조문화재의 대부분은 옥외에 노출된 상태로 위와 같은 암석의 일반적인 풍화과정에 의해 훼손되어 원형을 잃고 문화재로서의 가치를 상실하는 경우가 많다. 따라서 석조문화재를 대상으로 체계적인 보존시스템을 확립하기 위해서는 구성암석의 재질특성 및 풍화훼손도 진단과 같은 보존과학적 연구가 수행되어야 한다.^{5,6,7}

우리나라 마애불의 대부분은 사면의 자연암반에 조각되어 있어 많은 불연속면이 발달하며, 이 불연속면에 식생이 분포하여 암석의 풍화작용을 가속시킨다. 또한 우기에는 우수의 이동 통로가 되며 토사를 운반시켜 구조적 불안정을 야기하는 원인이 되기도 한다. 그러나 이와 같은 마애불의 재질특성과 구조적 안정성에 관한 연구는 극히 미진하여 앞으로 심도 있는 정량적 연구가 필요하다.^{8,9} 이 연구에서는 서산 마애삼존불을 대상으로 구성암석의 재질특성을 연구하고 풍화 및 훼손상태를 종합적으로 진단하였다. 또한 삼존불이 조각된 암반사면의 불규칙한 불연속면에 대한 주향과 경사를 측정하여 구조적 안정성을 검토하였다. 이 결과는 삼존불의 보존방안을 제시하는 기초 자료로 활용될 것이며 나아가 석조문화재의 보존시스템 확립에 중요한 자료가 될 것이다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

서산 마애삼존불상은 행정구역상 충남 서산시 운산면 용현리 2-1 번지에 있다. 이 삼존불은 가야산 북쪽자락 해발고도 125m의 능선 하단에 10m가 넘는 거대한 자연암반에 S40°E 방향으로 조각되어 있다. 주변에는 식생이 밀집된 상태로 삼존불이 조각된 암반은 다양한 모양과 크기를 갖는 수십 개의 암괴로 분리되어 있으며 보호각의 상부와 양측으로 수직, 수평 및 저경사를 갖는 절리들이 발달하고 있다(Figure 1A, 1B). 이 삼존불은 깊은 역사와 신앙의 배경을 갖고 있는 백제의 대표적인 불상으로 일반적인 삼존불과는 달리 가운데 부처를 중심으로 좌측에 보살입상과 반가사유상이 배치된 특이한 삼존형식을 취하고 있다.

본존불(2.8m)은 묵중하고 중후한 체구에 등근 맛이 감도는 세련된 조각수법으로 연꽃잎을 새긴 대좌위에서 있으며 살이 많이 오른 얼굴에 반원형의 눈썹, 살구 씨 모양의 눈, 얇고 넓은 코, 미소를 띤 입 등을 표현하였는데, 전체 얼굴 윤곽이 둥글고 풍만하여 백제 특유의 자비로운 인상을 보여준다. 머리에 관을 쓰고 있는 좌측의 보살입상(1.7m)은 얼굴에 본존과 같이 살이 올라 있는데, 눈과 입을 통하여 만면에 미소를 풍기고 있다.

상체는 옷을 벗은 상태로 목걸이만 장식하고 있고, 하체의 치마는 발등까지 길게 늘어져 있다. 동안으로 보이는 오른쪽의 반가상(1.66m) 역시 만면에 미소를 띤 둥글고 살찐 얼굴로 오른쪽 다리를 올리고 왼손으로 발목을 잡고 있으며 오른쪽 손가락으로 턱을 받치고 몸을 약간 옆으로 튼 대담한 구성을 통해 부조상으로서의 평면성을 극복하고 있다는 견해가 있다(Figure 1C).¹⁰

이 삼존불은 1974년도에 설치된 폐쇄형 한옥 목구조물 형태의 보호각이 암반사면에 맞대어 현존하여 왔다. 이에 관하여는 보호와 관람의 양면성에 대하여 오랜 논란 과정을 거치게 되었다. 이 폐쇄형 보호각이 대기의 순환에 부적합하며 관람에도 지장을 주는 등 보호기능에서의 한계점이 부각되면서, 2006년 3월에는 보호각의 지붕과 기둥, 안쪽 벽면의 일부만 남기고 3면의 벽면을 모두 개방하였다(Figure 1D, 1E). 이에 따라 상습적으로 발생하던 결로현상은 완화된 것으로 나타났으나 근본

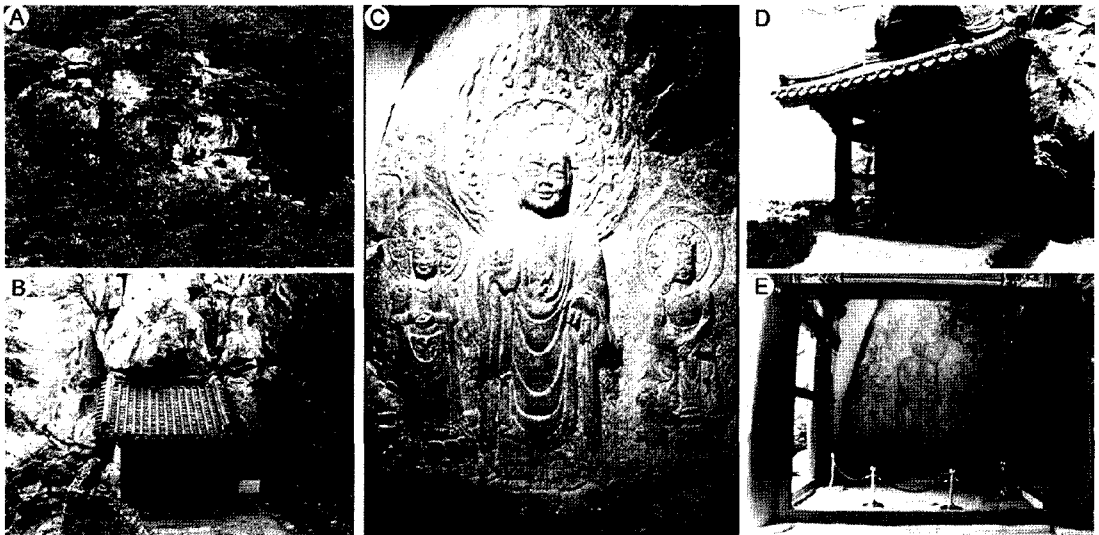


Figure 1. Field occurrences of the Seosan Maesamjonbulsang. (A, B) Host rocks of the triad Buddha are well developed with discontinuity systems. (C) The frontal appearance of the triad Buddha. (D, E) Recently, Korean style wooden shelter open three walls through dismantled concrete wall.

적인 보존에는 또 다른 문제점을 야기할 가능성이 있다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 서산 마애삼존불상의 주변 지형 및 지질조사를 수행하였고 정밀 야외조사를 통해 구성암석의 재질특성 연구를 위한 암석시료 수습 및 전암 대자율을 측정하였다. 또한 삼존불의 훼손상태를 정량적으로 진단하였다. 한편 이 삼존불이 조각된 암반에 발달된 불연속면의 주향과 경사를 측정하여 구조적 안정성을 검토하였다.

채취된 암석시료는 반정량적인 광물조성, 구성광물의 광학적 특징과 상호관계를 통한 조직, 변질광물의 생성을 관찰하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 편광현미경은 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다. 또한 암석시료의 정밀한 동정을 위하여 일부 시료에서 X-선 회절분석을 실시하였다. 여기에 사용된 분석기기는 Bruker제 모델 D8 Advance로 X-선은 $CuK\alpha$ 에 조건은 40kV와 40mA이다.

암석의 전암 화학분석을 통한 주성분, 미량, 희토류원소의 정량에는 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP-

AES, ICP-MS)와 중성자활성분석기(INAA)가 이용되었다. 삼존불로부터 탈락된 미세 암편의 표면 오염형상을 관찰하기 위해 사용된 주사전자현미경(SEM)은 Oxford사의 에너지 분산형 성분분석기(EDX, Inca M/X)가 장착된 JEOL사의 JSM 3665F이다. 대자율 측정은 10^5 SI 단위의 측정한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하여 측정하였고, 대자율의 크기는 10^3 SI 단위로 표기하였다. 야외조사를 통한 불연속면의 주향과 경사에 대한 측정치는 정리 후 WINDOW용 DIPS 프로그램을 이용하여 도식화하고 암반의 거동특성을 분석하였다.

3. 암석분포 및 재질특성

3.1. 암석분포

서산 마애삼존불상은 한반도의 지체구조상 경기육괴의 서남단에 위치한다. 이 지역은 선캠브리아기의 편마암류가 최고기 기반암을 형성하며 중생대 주라기의 대보 화강암류가 관입하여 저반을 이루는 지역이다. 이 대보 화강암류의 암질은 비교적 균질하나 조립질 혹은모 화강

암, 중립질 흑운모 화강암, 우백질 화강암, 담홍색 화강암 등의 암상을 보이고 반상화강암, 섬록암, 세립질 화강암 등도 분포한다.

이 암석들은 야외에서 조직 또는 조성광물의 차이에 의한 뚜렷한 경계면이 보이지 않고 점이적이다. 이는 동일한 저반체 내에서 다양한 암상이 분화된 동원 마그마로부터의 정출분화작용에 의한 것으로 추정된다. 가야산 자락에 위치하는 서산 마애삼존불의 암석분포는 가야봉-상왕산의 주산체를 형성하는 흑운모 화강암으로 이는 이 지역 대보화강암류의 주류를 이룬다. 삼존불의 서쪽으로는 시대미상의 대호지층이 남북방향으로 분포하고 있고 북동쪽을 따라서 선캠브리아기층의 편암암류가 가야산체의 주변부에 산재되어 노출되어 있다.¹¹

3.2. 재질특성

서산 마애삼존불상이 조각된 암석은 정밀 야외조사와 실내연구를 통하여 중립질 흑운모 화강암으로 규명되었다. 이 암석은 인장절리를 비롯한 다양한 불연속면의 발달로 암괴의 크기와 모양이 다른 불규칙형을 보이며 페그마타이트와 석영 세맥도 산재한다(Figure 2A, B). 이 삼존불과 동일한 암상을 보이는 암편을 암반의 주변에서

수습하였으며, 광물학적 및 조직적 특징을 확인하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 이 암석의 주요 조암광물은 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모로 완정질의 조직을 이루며 중립질의 크기를 갖는다.

또한 과동소광을 보이는 타형의 석영과 격자형 쌍정을 보이는 미사장석, 반자형 내지 타형의 정장석 및 알바이트와 칼스바드 쌍정이 발달된 사장석이 관찰된다(Figure 2C, 2D). 한편 변질에 의해 장석류의 대부분은 견운모화 작용을 받았으며, 대부분의 흑운모는 벽개면을 따라 녹니석화 되었다(Figure 2E, 2D). 시료의 일부를 분말화하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 이 결과 모든 시료에서 석영, 정장석, 사장석, 운모가 검출되었으며, 일부 시료에서 흑운모의 풍화에 의해 생성된 변질광물인 녹니석이 검출되어 암석의 풍화가 진행됨을 확인하였다(Figure 3).

이 암석의 지구화학적 특징을 살펴보기 위해 수습한 암석시료의 전암 화학분석을 실시하여 주성분원소와 미량원소 및 희토류원소의 함량을 분석하였다(Table 1). 또한 주성분원소의 분석결과를 이용하여 화학적 풍화지수(CIA)와 풍화잠재지수(WPI)를 구하였다. 암석의 주성분원소의 조성은 모든 시료에서 거의 비슷한 범위를

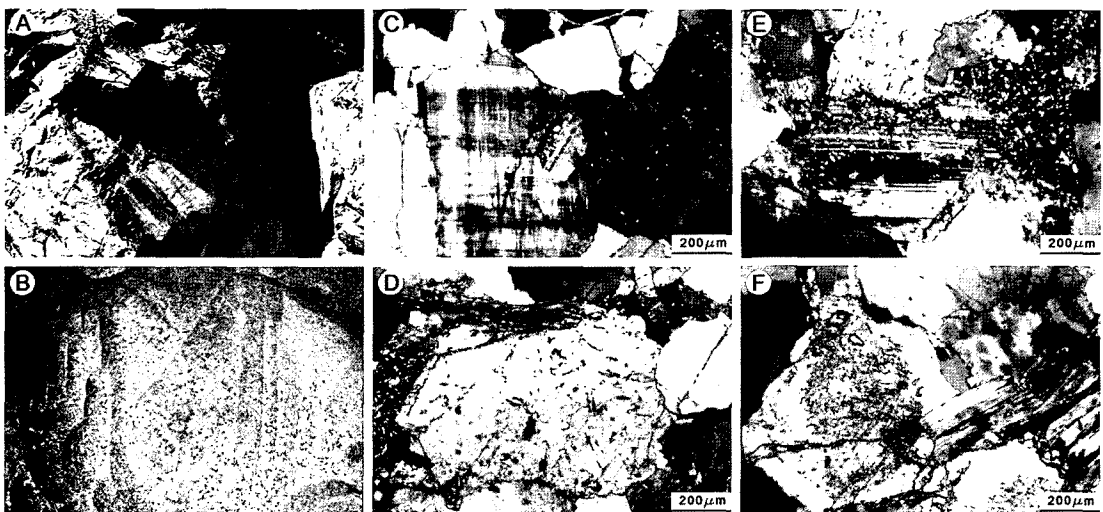


Figure 2. Lithology of rock properties and photomicrographs showing the host rocks of the Seosan Maesamjonbulsang. (A) The host rock is developed irregular discontinuity plane. (B) Pegmatite vein developed partly in the host rock. (C, D) Microphotograph showing rock forming minerals of the quartz, lattice microcline, orthoclase, plagioclase with albite twin. Plagioclase with carlsbad twin sericitized by alteration. (E, F) Most of the feldspars such as plagioclase with albite and orthoclase are altered to sericite and biotite is chloritized.

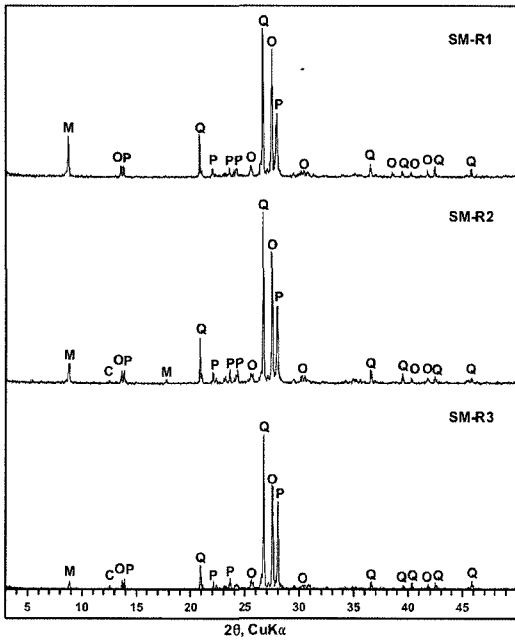


Figure 3. X-ray powder diffraction patterns showing the host rock of the Seosan Maaesamjonbulsang. Q: quartz, O: ortho-clase, P: plagioclase, M: mica, C: chlorite.

보였으며, 풍화지수는 53.88~54.82로 신선한 화강암에 비해 약간 높은 화학적 풍화도를 보인다. 또한 풍화잠재지수는 0.01~0.02로 화학적 풍화작용의 잠재력이 매우 높은 것으로 나타났다.

3.3. 전암 대자율

이 삼존불을 구성하는 암석을 대상으로 전암 대자율을 측정하였다. 전암 대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로 외부 자기장에 대한 자화강도를 의미하며, $I = k \cdot H$ 로 정의된다. 여기서 I는 자화강도, H는 자기장이며, k는 대자율이다. 대자율은 물질의 자기적 특성을 결정하는 상수로 암석 내 불투명 광물로 나타나는 강자성 광물인 자철석의 함량에 의해 크게 좌우되며, 자철석 함량과 정의 상관관계를 가진다.

이 값은 진공에서 $k=0$ 이며 일반적인 화강암의 대자율은 $2.512(\times 10^{-3}$ SI unit)이다. 이는 대자율 값 $1.256(\times 10^{-3}$ SI unit)을 기준으로 이 값보다 높으면 자철석 계열, 낮으면 티탄철석계열로 화강암류를 분류하여

Table 1. Contents of major (wt.%), minor and rare earth elements (ppm) in constituting rock of the Seosan Maaesamjonbulsang.

No.	SM-R1	SM-R2	SM-R3
SiO ₂	73.58	73.75	73.49
Al ₂ O ₃	13.46	13.45	13.55
Fe ₂ O ₃	1.64	1.43	1.28
MnO	0.04	0.02	0.03
MgO	0.18	0.16	0.13
CaO	0.63	0.34	0.47
Na ₂ O	2.90	3.01	2.61
K ₂ O	5.07	5.49	5.56
TiO ₂	0.11	0.11	0.10
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.02
LOI ¹⁾	1.66	1.95	1.61
Total	99.31	99.73	98.84
CIA ¹⁾	54.14	53.88	54.82
WPI ²⁾	0.02	0.01	0.02
Ba	277	270	313
Be	4	4	4
Co	5	3	4
Cr	374	321	407
Cs	7.5	4.4	7.8
Cu	33	17	10
Hf	4.3	3.3	3.5
Ni	178	161	199
Pb	44	40	45
Rb	280	260	280
Sb	0.2	0.2	0.2
Sc	4.3	3.4	2.9
Sr	79	74	74
Ta	3	2	2
Th	67	36.1	43.3
U	11	4.4	5.5
Y	38	18	28
Zn	46	30	34
Zr	128	111	110
La	43	31.4	25.8
Ce	112	62	60
Nd	35	24	20
Sm	8.1	4.8	4.6
Eu	0.7	0.4	0.4
Tb	1	< 0.5	< 0.5
Yb	4	2.3	2.8
Lu	0.57	0.31	0.43

Fe₂O₃: as total FeO, LOI¹⁾: loss-on-ignition, CIA¹⁾: chemical index on alteration, WPI²⁾: weathering potential index.

자철석의 광역적 분포를 파악할 수 있다.¹² 대자율의 측정은 10⁻⁵ SI 단위의 측정한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델을 사용하여 측정하였고 대

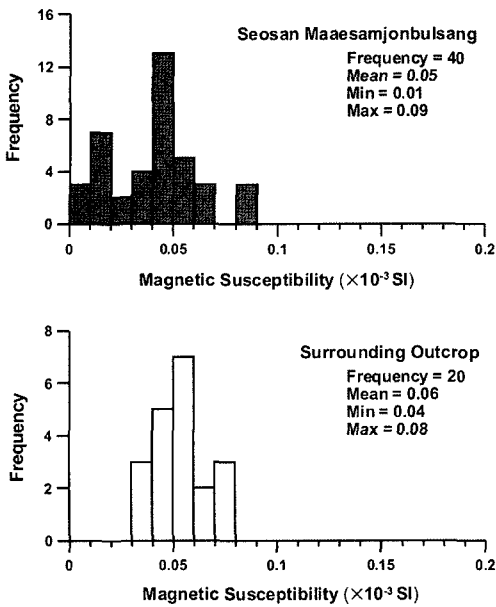


Figure 4. Magnetic susceptibilities of the host rock of the Seosan Maaesamjonbulsang (upper) and outcrop near the triad Buddha (lower).

자율의 세기는 10^{-3} SI 단위계로 표기하였다.

측정은 삼존불이 조각된 암반의 모든 방위에서 측정하였고 주변암으로 보원사지 쪽 노두를 대상으로 측정하였다. 이 결과, 삼존불이 조각된 암반의 대자율 값은 $0.01\sim 0.09(\times 10^{-3}$ SI unit)의 분포범위를 보이며 평균 $0.05(\times 10^{-3}$ SI unit)의 값을, 주변암인 보원사지 쪽 노두암의 측정값은 $0.04\sim 0.08(\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위를 보이며 평균 $0.06(\times 10^{-3}$ SI unit)의 수치로 거의 동일한 대자율 분포를 나타냈다(Figure 4). 이는 이 삼존불을 구성하는 암석 및 주변암이 티탄철석 계열의 중립질 흑운모 화강암임을 지시하는 것이다.

4. 훼손상태 및 불연속면의 거동

4.1. 기계적 풍화와 훼손

일반적인 화강암질암은 고온고압 하에서 생성되며 지표의 대기환경에 노출될 때 높은 압력의 제거로 인해 암석이 팽창하여 많은 공극과 불연속면을 갖게 되며 풍화

작용을 받는다. 물리적 및 기계적 풍화작용이란 이러한 암석 내부의 공극과 불연속면을 따라 수분의 이동과 함께 온도변화에 따른 물의 동결과 융해의 반복을 통한 쉼기작용, 물-암석 반응에 의해 생성되는 풍화잔류물의 결정작용 및 주변의 식물작용에 의한 기계적 훼손 등 큰 화학적 변화 없이 입자와 입자의 경계부, 공극과 광물의 불연속면을 따라 입자들이 깨지는 물리적인 분해현상을 말한다.

이와 같은 현상은 암석의 물성변화를 일으키고 기계적 풍화작용의 반복에 의해 박리와 박락이 발생되며 균열 및 절리로 발전되어 석조문화재의 구조적 불안정성을 야기한다. 이 삼존불을 구성하는 암반은 수십 개의 암피로 분리되어 있으며 보호각 상부와 양측으로 수직, 수평 및 저경사를 갖는 절리들이 발달된 상태이다. 이 삼존불의 좌협시불(반가사유상)에는 암반의 절리가 연장되어 발달하고 있으며, 이는 상부의 강수가 절리를 따라 흘러 내려와 침수대를 형성하고 있다. 특히 이 절리는 보호각 상부의 배수대와 연결되어 강수가 유도됨으로 수분에 의한 암석의 물리적 및 화학적 풍화를 촉진시킨다(Figure 5A).

이 삼존불의 곳곳에서는 균열현상을 보인다. 특히 본존불의 두부 측면을 따라 발달한 균열은 탈락을 유발할 것으로 예상된다(Figure 5B). 또한 이 삼존불의 좌협시불(반가사유상)을 구성하는 팔에서는 탈락이 발생되었으며, 우협시불(보살입상)의 보주형 광배부분은 박리박락에 의한 훼손상태를 보인다(Figure 5C, 5D). 이와 같은 물리적 및 기계적 풍화와 훼손에 의한 연약대를 따라 절로현상이 발생하여 삼존불의 훼손을 가중시키고 있다. 그러나 절로현상은 최근 폐쇄형 보호각의 벽체면 해체를 통한 개방 이후 많이 완화된 것으로 나타났다.

4.2. 이차적 오염물질에 의한 훼손

석조문화재는 미세한 토양이나 먼지와 같은 오염물이 피복되거나 광물의 화학적 풍화로 인해 생성되는 이차광물의 표면 침착 및 침전으로 원암의 색이 변질 또는 착색되어 본래의 모습을 상실하는 경우가 많다. 이러한 화학적 풍화작용은 표면의 변색뿐만 아니라 구성석재의 성분, 성질 및 조직의 변화를 일으켜 암석의 훼손을 가중시킨다. 화학적 풍화는 물과의 반응을 바탕으로 주로 용해,

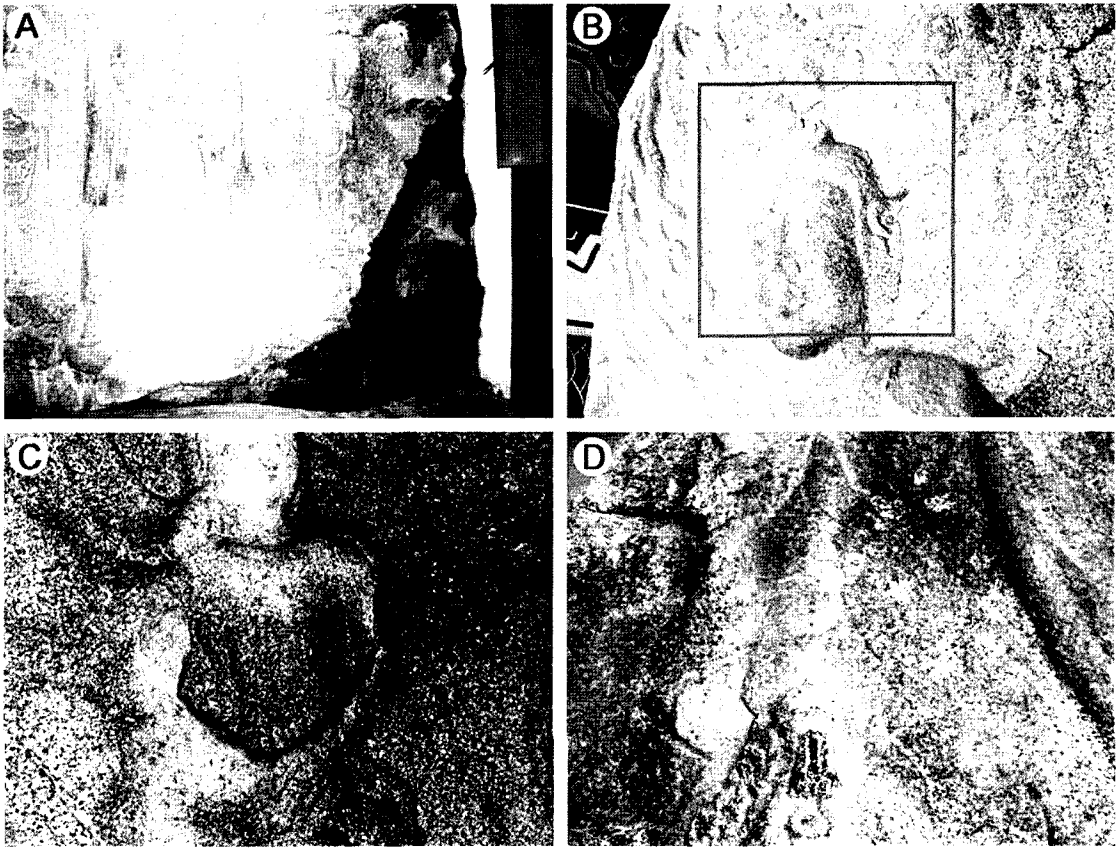


Figure 5. Mechanical weathering state of the Seosan Maaesamjonbulsang. (A) Submerged area is formed along the joint which develop near the left assistant Boddhisatvas. (B) Fracture is developed along the head of the Buddha. (C) The arms of the left assistant Boddhisatvas is partly broken-out. (D) A nimbus of the right assistant Boddhisatvas is deteriorated by exfoliations.

수화, 가수분해, 산화환원, 탄산화 및 킬레이트화 작용이 있으나 대부분이 서로 복합적으로 작용하여 석조문화재의 구성암석을 훼손시킨다.

이 삼존불의 표면은 이차적 오염물에 의한 변색이 심각한 상태로 암반의 경사를 따라 상부에서부터 표면의 전반에 걸쳐 회백색 오염물이 흘러내려 침전되었다(Figure 6A). 암반의 좌측을 따라 발달한 경사면을 중심으로 삼존불의 곳곳에서는 황갈색의 표면오염이 형성되었으며, 이는 주로 물리적 및 기계적 풍화에 의한 연약대 및 결로현상이 발생된 부분에서 관찰된다(Figure 6B). 또한 삼존불의 하부를 따라 적갈색 오염이 심각하며 질리를 따라 형성된 침수대쪽에는 암흑색 오염물질이 피복된 상태이다(Figure 6C).

이 삼존불 표면의 오염현상 중 용식되어 흘러내린 회

백색 침전물 일부를 수습하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 이 결과, 토양의 유입으로 인한 석영, 정장석, 사장석, 운모, 스멕타이트 및 녹니석과 함께 방해석이 동정되었다. 방해석(CaCO_3)은 탄산염 광물로서 시멘트 모르타르나 강회 같은 석회질 물질과 대기가스가 용해된 물과의 반응으로부터 생성된다(Figure 6D). 이러한 사실은 회백색 변색의 경우, 암반 상부의 시멘트 물질이 강수와 반응 후 용식되어 일부 미세토양과 함께 흘러내린 것임을 확인해 준다. 이 삼존불은 위와 같은 다양한 오염현상으로 표면의 변색이 심각한 상태이다.

4.3. 생물학적 훼손

암석의 생물학적 풍화 및 훼손은 크게 식물, 동물, 미

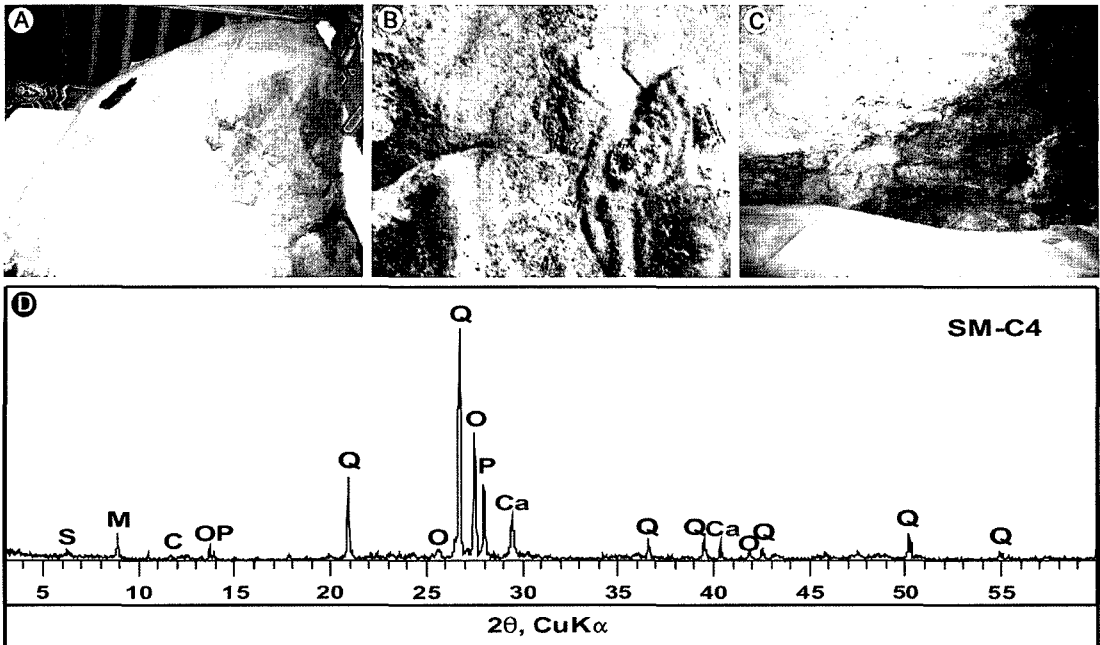


Figure 6. Discoloration of the Seosan Maaesamjonbulsang by secondary pollutant. (A) The triad Buddha show light gray pollutant all over the surface. (B). Yellowish brown pollutants is observed weakness area of the triad Buddha. (C) Reddish brown discoloration and dark pollutant showing near the submerged area. (D) X-ray powder diffraction pattern of the light gray pollutant. Q: quartz, O: orthoclase, P: plagioclase, M: mica, C: chlorite, S: smectite, Ca: calcite.

생물에 의해 이뤄지나 대부분 균류나 지의류 같은 미생물에 의해 시작된다. 지표환경에 노출된 암석은 공극과 불연속면을 따라 암석 조류와 질소고정 남조류, 유황세균 등이 번식하면서 미소토양과 미생물상을 형성한다. 이는 유기물의 중요한 발생학적 요인을 구성할 수 있는 장소를 제공하는 것으로 암석 표면에 생성된 미생물들은 뿌리나 균사가 가하는 기계적인 힘과 대사과정에서 생성된 유기산으로 암석의 분해와 풍화작용을 촉진시킨다.^{13,14}

서산 마애삼존불이 조각된 암반은 주변의 수목이 우거지고 습도가 높은 환경에 노출되어 생물학적 오염이 가중된 상태이다. 특히 절리에 서식하는 침엽수의 수근에 의한 피해가 심각하며 절리면 사이는 토양화로 인해 초본식물이 성장하고 있다(Figure 7A, 7B). 보통 식물의 뿌리가 토양 또는 암석에 가하는 근압은 10~15kg/cm² 정도로서 암석의 기계적 풍화를 촉진한다. 또한 식



Figure 7. Biological deterioration showing the host rock of the triad Buddha. (A, B) Woody plant and a herbaceous plant which deteriorate along the joint systems of the host rock (C) Rock surface is polluted by microorganism.

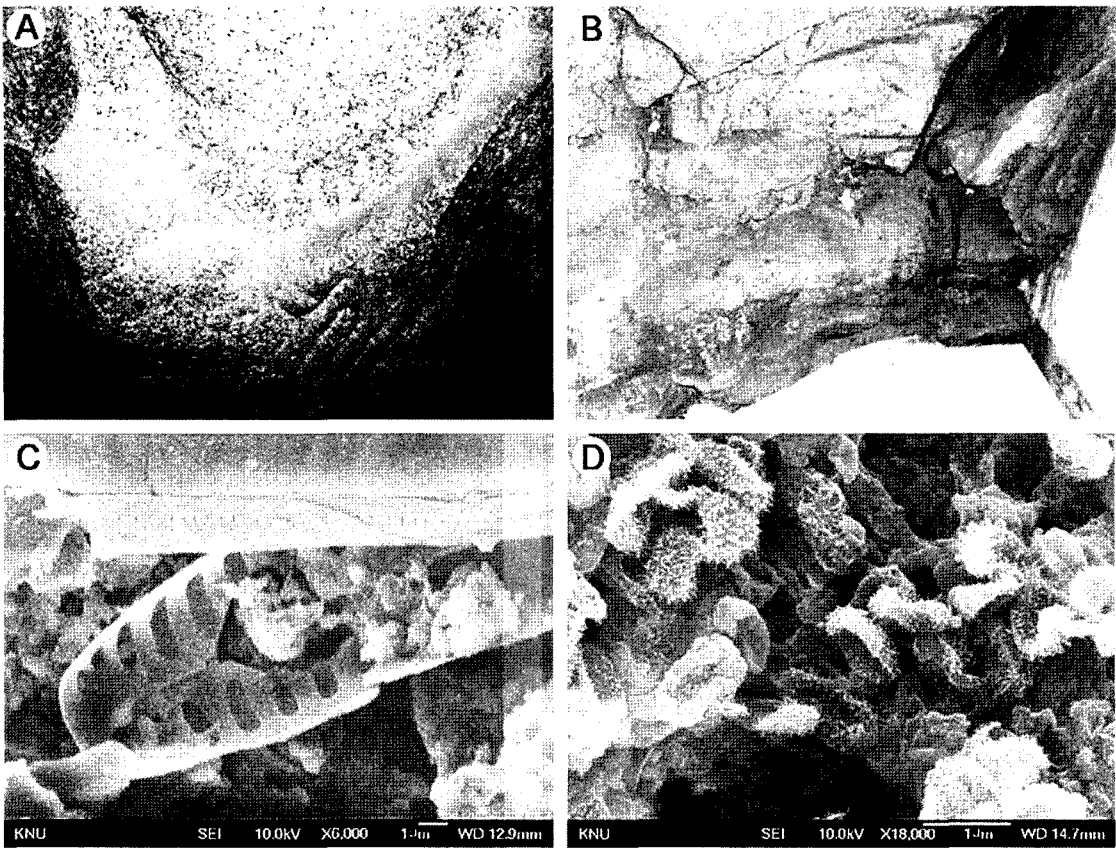


Figure 8. Biological pollution and scanning electron microphotographs (SEM) of the Seosan Maaesamjonbulsang. (A) Green algae grow supplied dust and moisture. (B) Biological pollutant of submerged area. (C, D) Scanning electron microphotographs show a diatom and various microorganism which grow at the rock surface.

물의 뿌리 끝에서의 극산성 분비물 발생과 식물의 호흡 작용 및 증발작용은 암석의 화학적 풍화에 중요한 역할을 한다.^{13,14,15} 따라서 암반에 분포하는 수목 및 초본식물은 기계적 및 화학적 풍화를 촉진시켜 절리를 확장하며 암반의 구조적 불안정을 가중시키는 심각한 훼손요인으로 작용한다.

서산 마애삼존불의 암석 표면에는 균류, 조류, 지의류나 선태류들이 고착되어 기생하면서 황갈색, 청남색, 진녹색의 다양한 산출상태를 보인다(Figure 7C). 이러한 미생물들은 암석의 토양화를 진행시키며 고등식물의 서식처를 제공하여 생물학적 훼손을 가중시킨다. 반면에 보호각 안에 있는 삼존불에는 생물학적 훼손이 심각하지는 않으나, 통풍이 원활하지 못한 폐쇄형 보호각 내부 환경에 의한 먼지의 침착과 수분의 공급으로 녹조류와 같

은 미생물의 성장이 관찰된다(Figure 8A).

또한 삼존불이 조각된 암반으로부터 연장된 절리를 따라 토사를 포함한 강수의 흐름으로 생성된 침수대에는 생물오염이 진행된 상태이다(Figure 8B). 침수대에서 탈락된 미세암편을 주사전자현미경으로 관찰한 결과 암석의 풍화산물인 점토광물과 함께 규조류를 비롯한 다양한 유기물의 산출상태를 관찰할 수 있다(Figure 8C, 8D). 이를 통해 이미 암석 내부의 상당 깊이까지 생물오염이 진행된 것을 확인하였다.

4.4. 불연속면의 거동특성

지표에 노출되어 있는 대부분의 암반은 성인적 기원 및 대기, 강우, 지하수와 같은 지표환경에 의한 자연적



Figure 9. Strike and dip of the discontinuity plane are measured all over the host rock. (A) Southeastern frontal view of the rock-carved triad Buddha. (B) The left side of the rock-carved triad Buddha. (C) The right side of the rock-carved triad Buddha. (D) The upper part of the rock-carved triad Buddha. (E) Measurement of strike and dip on the upper part of the rock-carved triad Buddha.

요인과 인위적인 요인에 의해 풍화 또는 훼손과정을 거친다. 이러한 암반은 암석 자체의 강도가 약해질 뿐만 아니라 균열, 절리, 층리 및 단층과 같은 암반 내의 불규칙한 불연속면에 의해 구조적 불안정성을 보이며 다양한 형태로 파괴된다. 암반사면의 파괴형태는 암석의 강도에 의한 것보다 암반 내에 발달하고 있는 불연속면의 역학적 특성에 크게 영향을 받으며, 특히 가장 취약한 불연속면의 주향과 경사를 따라 파괴형태가 결정된다.

대표적인 파괴형태로는 원호파괴(circle failure), 평면파괴(plane failure), 쐐기파괴(wedge failure), 전도파괴(toppling failure)의 4가지로 구분된다. 원호파괴는 암석에 뚜렷한 구조적인 특징이 없고 깨어진 정도가 매우 심한 암석이나 토층에서 발생하며, 평면파괴는 점판암과 같은 연장성이 긴 불연속면에서 발생한다. 또한 쐐기파괴는 불연속면이 두 개 이상 교차하는 곳에서 발생하며 전도파괴는 경사면에 대하여 반대의 경사를 갖는 암반에서 흔히 볼 수 있다.

이 삼존불이 조각된 암반은 불규칙한 불연속면의 발달로 인하여 크기와 모양이 다양한 수십 개의 암괴로 이루어져 있다. 이는 식생이 밀집된 주변 환경 및 절리대를 따라 성장한 수목과 초본식물 등에 의한 생물학적 훼손으로 풍화가 가속된 상태이다. 또한 보호각 상부와 양측

으로 발달한 수직, 수평 및 저경사를 갖는 다양한 절리들은 삼존불의 구조적 문제점을 위협한다. 따라서 야외조사를 통해 삼존불을 포함한 암반의 전면(26개), 좌측(14), 우측(13) 및 상부(11)의 영역에 발달하는 총 64개 주 절리계의 주향과 경사를 클리노 컴퍼스(clinocompass)를 이용하여 측정하였다(Figure 9).

이와 같이 측정된 데이터를 구분하여 WINDOW용 DIPS 프로그램에 적용하였다. 이 결과를 가지고 평사투영법에 의한 암반에 발달된 불연속면들의 분포상태 및 주응력 방향과 암반의 평면파괴, 전도파괴, 쐐기파괴 가능성을 검토하였다. 평사투영법에서는 암반사면에 발달한 불연속면의 주향과 경사를 평사투영망인 반구체의 평면상에 극점으로 분포도를 도시화하고 대표하는 사면의 주향과 경사를 대원으로 표시한다. 또한 불연속면의 내부 마찰각과 파괴조건들을 기하학적으로 도식한 후에 위험 조건들에 부합된 평면파괴, 전도파괴, 쐐기파괴의 불안정 지역을 제시한다.

이 삼존불이 조각된 암반에 분포되어 있는 불규칙한 불연속면의 주 응력방향과 분포도를 로즈 다이어그램(Figure 10A)과 평사투영도(Figure 10B, 10C, 10D)로 도시하였다. 이 결과 대부분의 절리계는 N20~40°W와 N50~60°E의 주향을 갖는 수직, 수평 및 저경사

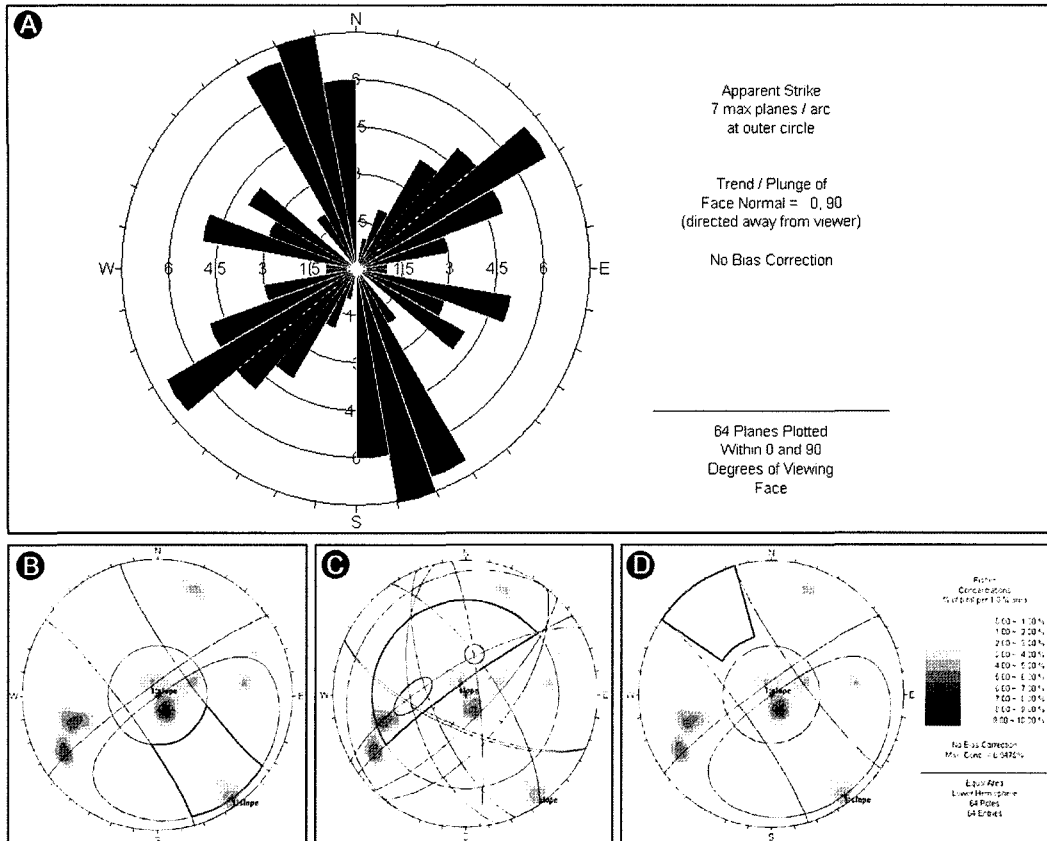


Figure 10. Behavior of discontinuity system. (A) Plotted on rose diagram. Thick lines and circles are faced fields of possible for plane (B), wedge (C), and toppling (D) failures, respectively.

를 갖는 다양한 분포를 보였다. 이러한 주응력 방향은 거의 직교하여 불안정한 암괴를 형성하고 있다. 삼존불이 조각된 불연속면의 주향(N54° E)과 경사(83° NW)를 대표 사면으로 불연속면의 분포도에 파괴유형별 안정성을 검토하고자, 화강암의 마찰각 중 일반적인 중립질 화강암의 마찰각 30°를 이용하였으며 평면파괴, 전도파괴, 쉼기파괴의 위험지역을 도시하였다.¹⁶

Figure 10B는 평면파괴를 도시한 것이다. 이는 암석의 내부 마찰각보다 크고 사면의 주향과 거의 일치하는 ±20° 주향범위로, 사면의 경사각보다 작은 영역이 평면파괴에 불안정한 장소이다. 여기에 한 무리군의 절리계가 존재하는 것으로 보아, 평면파괴에 있어 높은 불안정성을 보이는 것을 확인하였다. Figure 10C는 쉼기파괴를 도시한 것으로, 사면의 경사각보다는 작고 암석의 내부 마찰각보다는 큰 영역에 서로 반대되는 주향을 갖는 절

리의 교선이 존재하는 것으로 보아 쉼기파괴에도 불안함을 나타내고 있다.

이 사면의 경우, 분포하는 불연속면 중 대표 주향과 경사를 선별하여 쉼기파괴의 가능성을 확인하였으며, 그 결과 쉼기파괴에 있어서도 불안정성을 보였다. Figure 10D는 전도파괴를 도시한 것으로 급경사를 보이는 불연속면들이 사면의 경사방향과 반대로 위치하여 연속적인 암주들이 전방으로 낙반할 위험이 있는 영역으로서 이 사면은 전방도괴의 가능성을 보이고 있다. 따라서 삼존불이 조각된 암반의 불연속면들은 평면파괴 및 쉼기파괴와 전도파괴의 위험지역에 모두 분포하고 있어 암반이 구조적으로 불안정한 상태임을 지시하고 있다.

5. 보존과학적 고찰

이 삼존불의 표면은 다양한 생성원인에 의한 회백색, 황갈색, 적갈색 및 암흑색 등의 이차적 오염물에 의한 표면 변색이 심각한 상태이다. 이러한 표면 오염현상으로 인해 삼존불은 원암의 암색을 알아 볼 수 없을 뿐 아니라 백제의 미소를 잃은 지 오래다. 따라서 삼존불 표면의 다양한 산출상태를 보이는 오염물질들을 성인적 유형에 따라 분류하고, 오염물질의 종류와 산출상태 및 오염증을 정량적으로 규명해야 할 것이다.

이와 같이 오염물의 생성요인을 정확히 파악한 후 이에 적합한 세정작업이 이루어져야 하며 이에 관한 연구 사례도 있다.¹⁷ 삼존불 표면은 침착된 먼지와 수분의 공급으로 인해 일부에서 녹조류가 관찰되며, 침수대 또한 표면에서 생물오염 현상이 보인다. 이는 보호각 외부 암반의 생물학적 훼손에 비해 덜한 편이지만, 이러한 유기물은 암석의 분해와 풍화작용에 중요한 부분을 차지하므로 발견과 즉시 제거되어야 한다.

이 삼존불은 암반으로부터 연장되는 절리와 균열이 발달하고 있으며 좌협시불(반가사유상)측의 절리에서는 상부로부터 흘러내려온 강수에 의해 침수대가 형성되어 있다. 또한 삼존불 곳곳에서는 탈락 및 박리박락의 훼손 현상이 보인다. 특히 침수대를 형성하는 절리는 보호각 상부의 배수대와 직접적으로 연결되어 강수를 유도하며 보호각 내부로 연장된 절리대를 따라 흘러들어 암석의 기계적 및 화학적 풍화를 촉진시키고 있다. 이 뿐만 아니라 삼존불을 이루는 암석은 이와 같은 물리적 및 기계적 풍화훼손에 의해 생성된 연약대를 따라 결로현상이 나타나며, 이는 폐쇄적인 보호각 내 미기상 환경에 의해 수분 유지 시간이 길어 훼손을 촉진할 것이다.

따라서 이 삼존불은 보존처리가 실시되기 전에 내부의 물리적 및 기계적 풍화를 촉진시키는 환경정비의 일환으로 보호각 지붕의 우측에 있는 배수대를 절리대와 멀리하여 설치하여야 할 것이며, 보호각 내부의 환경변화를 진단하여 보호각에 의한 훼손을 최소화해야 한다. 이러한 보호각 내 보존환경 연구의 필요성은 최근 보호각의 벽체면 해체를 통한 개방 이후 결로현상과 이에 따른 수분유지가 전보다 훨씬 완화된 모습을 통해 입증된다. 석조문화재의 보존처리에는 외관을 훼손하지 않도록 충전제와 발수경화제 등의 보수용 접착제로 시공하는 것

이 일반적이며, 풍화된 석재의 표면을 강화시키는 방법도 알려져 있다. 이에 관한 실제적용과 문제점도 이미 보고된 바 있다.^{18,19,20,21}

이 삼존불의 주변지형은 밀집된 식생과 계곡 등으로 인하여 습도가 높아 풍화를 가속시킬 수 있는 환경이다. 삼존불이 조각된 암반은 불규칙한 불연속면의 발달로 모양과 크기가 다양한 수십 개의 암괴로 구성되어 있다. 특히 보호각의 상부와 양측에서는 수직, 수평 및 저경사를 갖는 절리가 발달되어 있어 마애불의 구조적 안정성을 위협한다. 또한 암반의 절리대를 따라 서식하는 침엽수의 수근 및 초본식물은 생물학적 훼손을 가중시키고 있다. 한편 암반에 발달된 불연속면의 분포도 및 주응력방향과 암반의 평면파괴, 썩기파괴, 전도파괴의 가능성 여부를 평사투영법을 통해 도식한 결과, 암반에 발달한 불연속면들이 불안정한 사면환경에 노출된 상태임을 지시하였다.

따라서 암반의 이러한 구조적 불안정으로부터 삼존불을 보호하기 위해서는 암반을 포함한 주변의 식생환경 정비가 필요하다. 특히 암반의 절리대 사이의 곳곳에서 보이는 수목의 성장은 큰 훼손요인이다. 이에 대한 보존 방안으로는 수목의 성장을 억제하거나 제거하는 방안이 있으나 이미 제거하는 것 자체가 암반의 구조적 안정성에 문제를 일으킬 수 있으므로 신중히 고려한 후 수행되어야 할 것이다. 또한 암반의 정량적 거동측정기를 통한 지속적인 모니터링을 통해 보다 정밀한 암반의 거동특성을 파악하여 암반의 구조적 불안정성에 대한 예방보존이 요구된다.

6. 결론

1. 서산 마애삼존불의 구성암석은 중립질 흑운모 화강암이다. 주요 조암광물로는 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모로 대부분의 장석류는 풍화작용에 의해 변질된 상태를 보인다. 또한 이 삼존불의 전암 대자율 값은 $0.01 \sim 0.09 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 분포로 티탄철석 계열의 화강암질암이다. 이 삼존불은 암반으로부터 절리가 연장되어 발달하고 있으며, 이 부분은 상부의 강수가 절리를 따라 흘러 내려와 침수대를 형성하고 있다. 주변의 곳곳에서는 균열현

- 상을 보이는데 특히 본존불의 두부 측면을 따라 발생한 균열은 탈락의 위험을 보이므로 응급 보존처리가 요구되어 진다.
2. 이 삼존불은 암편탈락 및 표면의 박리박락과 같은 훼손현상을 보이며 이와 같은 연약대를 따라 결로 현상이 나타나 훼손이 가중되고 있었으나, 최근 보호각 벽체면의 해체를 통해 완화된 상태를 보인다. 삼존불 표면은 회백색, 황갈색, 적갈색 및 암흑색의 이차적 오염물에 의한 표면 변색이 심각한 상태이다. 따라서 각각의 오염물에 대한 생성요인을 정확히 파악한 후 이에 적합한 세정작업이 이루어져야 한다.
 3. 삼존불이 조각된 암반은 주변의 식생이 밀집되고 습도가 높은 환경에 노출된 상태로 생물학적 오염이 가중된 상태이다. 특히 절리를 따라 서식하는 수목 및 초본식물의 훼손이 심각하며, 표면에는 다양한 산출상태를 갖는 미생물에 의해 오염되어 있다. 보호각 내에 있는 삼존불의 생물학적 오염은 보호각 외부의 암반에 비해 심각하지 않으나, 관찰되는 녹조류를 비롯한 생물오염은 토양층에서 중요한 발생학적 요인을 구성하므로 제거해야 한다.
 4. 암반에 발달된 불연속면의 분포도 및 주응력방향과 암반의 평면파괴, 쉼기파괴, 전도파괴의 가능성 여부를 평가투명법을 통해 도식한 결과, 서산 마애삼존불의 암반에 발달한 불연속면들은 불안정한 사면 환경에 노출된 상태임을 확인 할 수 있었다. 암반의 이러한 구조적 불안정으로부터 삼존불을 보호하기 위해서는 암반을 포함한 주변의 식생환경 정비가 필요하며, 암반의 거동계측기를 통한 지속적인 모니터링을 통해 보다 정밀한 거동특성을 파악하여 암반의 구조적 불안정에 대한 대비가 필요하다.

참고문헌

1. W. Chesworth, "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. J. Fidler, "Stone building, construction and associated component system: their decay and treatment". *English Heritage Research Transactions*, 2, 1-104 (2002).
3. G.G. Amoroso and V. Fassina, "Stone decay and conservation". *Materials Science Monographs II*, New York, Elsevier (1983).
4. M. Lisci, M. Monte and E. Pacini, "Lichens and higher plants and stone: a review". *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51, 1-17 (2003).
5. 이상현, "석굴암을 이루는 암석의 풍화현상". *보존과학회지*, 8, 1-9 (1999).
6. C.H. Lee, MS. 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).
7. 양희재, 김사덕, 이찬희, 최석원, "익산 미륵사지 석탑의 해체과정과 구성부재의 훼손도 평가". *보존과학회지*, 16, 77-88 (2004).
8. 이찬희, 정연삼, 김지영, 이정은, "옥천 용암사 마애불의 거동특성 해석과 이차적 훼손". *보존과학회지*, 17, 83-94 (2005).
9. 이찬희, 이명성, 서만철, "영주 가흥리 마애삼존불상의 풍화특성과 불연속면의 안정성 해석". *지질학회지*, 41, 3 39-51 (2005).
10. 문화재청, "문화재 상세정보, 국보 제 84호 서산 마애삼존불상". www.ocp.go.kr (2006).
11. 신병우, 소철섭, 박봉순, 이상현, "해미도폭 지질 보고서(1:50,000)". *한국동력자원연구소*, (1989).
12. S. Ishihara, "Granitoid series and mineralization in the circum-pacific phanerozoic granitic belts". *Resource Geology*, 48, 219-224 (1998).
13. W.D. Billings, "Vegetation and plant growth as affected by chemically altered rocks in the Western Great Basin". *Ecology*, 31, 62-74 (1950).

14. R.R. Brooks, "Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration". *Haper and Row, New York*, 290 (1972).
 15. F.E. Eckhart, "Microorganisms and weathering of a sandstone monument". *Environmental Biochemistry and Geomicrobiology*. 2, 675-686 (1978).
 16. 이 송, 이규환, 채점식, 사면의 설계와 시공. *예문사*, 139 (2002).
 17. 이동식, 이찬희, 김지영 "익산 미륵사지 석탑에 사용된 콘크리트의 재료학적 특성과 석재의 풍화에 미치는 영향". *자원환경지질*, 39, 285-299 (2006).
 18. C.H. Lee, S.W. Choi and M. Suh, M. "Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea". *Geotechnical and Geological Engineering*, 21, 63-77 (2003).
 19. 이명성, 정민호, 정영동, 이찬희, "경주 서악리 삼층석탑의 훼손상태 및 보존처리". *보존과학회지*, 18, 63-74 (2006).
 20. 김사덕, 김순관, 김창석, 홍정기, 강대일, 이명희, "석조문화재 예폭시수지 개발 시험연구". *보존과학연구*, 20, 139-155 (1999).
 21. 엄두성, 김사덕, 홍정기, 강대일, 이명희, "석조문화재 발수경화제 시험연구(1)". *보존과학연구*, 20, 155-173 (2006).
-