

화순 운주사 석조불감의 재질특성과 풍화훼손도 평가

박성미* | 이명성*¹ | 최석원** | 이찬희*

*공주대학교 문화재보존과학과, **공주대학교 지질환경과학과

Material Characteristics and Deterioration Assessment of the Stone Buddhas and Shrine in Unjusa Temple, Hwasun, Korea

Sung-Mi Park* | Myeong Seong Lee*¹ | Seok Won Choi** | Chan Hee Lee*

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

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

*¹Corresponding Author : mslee@kongju.ac.kr, +82-41-850-8543

초 록 화순 운주사 석조불감(보물 제797호)은 고려시대 양식을 갖추고 있는 석조문화재로서 아주 독특한 형식적 특징을 보여준다. 남북의 감실 내부에는 각각의 불상이 등을 맞대고 있는 쌍배 좌상의 형태를 보이고 있어 역사적, 미술사적 및 학술적으로 높은 평가를 받고 있다. 그러나 이 석조불감은 특별한 보호시설 없이 옥외에 노출되어 장기간의 풍화작용으로 다양한 훼손양상이 복합적으로 나타나고 있다. 이 석조불감은 총 47매의 암석으로 구성되어 있으며, 총 하중은 약 56.6톤이다. 구성 재질은 주로 회백색의 유리질 조직을 갖는 화산력 응회암류로 암편질 응회암과 유문암질 각력응회암이다. 또한 이들의 보수과정에서 부분적으로 흑운모 화강암을 사용하였다. 이들 응회암질암의 화학적 풍화지수는 52.1~59.4이나, 대체적인 화강암은 보다 신선한 50.0~51.0을 보인다. 이 연구에서는 석조불감에 나타나는 손상유형을 크게 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화로 구분하여 훼손양상에 따라 종합훼손지도를 작성하였고, 표면적 대비 점유율을 산출하였다. 이 결과, 물리적 풍화양상 중 박리박락이 모든 방위에서 가장 높은 점유율을 보였으며, 방위로는 석감의 남측 면이 39.1%로 가장 높은 풍화도를 보였다. 화학적 풍화는 흑색 변색, 황갈색 변색, 백화 현상 순으로 나타났으며 석감의 서측 면에서 61.2%의 높은 점유율을 보인다. 육안으로 볼 때, 가장 심각한 훼손을 보이는 생물학적 풍화는 회색지의류가 압도적으로 높으며, 석조불감 북측 면이 38.3%로 가장 높게 나타났다. 따라서 균열과 박리박락이 심한 부재의 접합 및 보강이 선행되어야 하며, 이차적 오염물질과 생물들은 정기적인 세정을 통해 제거하는 등 각각의 손상도에 적합한 보존방안의 수립과 임상실험을 통한 과학적 처리가 필요하다.

중심어 : 석조불감, 암편질 응회암, 유문암질 각력응회암, 흑운모 화강암, 풍화, 종합훼손지도

ABSTRACT The stone Buddhas and Shrine of Unjusa temple (Korea Treasure No. 797) in Hwasun formed in Koryo Dynasty are unique style which the Buddha faces each other the back parts of south and north within the stone Shrine. The stone Buddhas and Shrine are highly evaluated in historical, artistic and academic respects. But, the stone properties have been exposed in the open system various aspects of degradations weathered for a long time without specific protective facil-

ities. The rock materials of the stone Buddhas and Shrine are about 47 blocks, and total press load is about 56.6 metric ton. The host rocks composed mainly of white grey hyaline lithic tuff and rhyolitic tuff breccia. In addition, biotite granite used as part during the restoration works. The chemical index of alteration for host tuffaceous rocks and the replacement granites range from 52.1 to 59.4 and 50.0 to 51.0, respectively. Weathering types for the stone Buddhas and Shrine were largely divided with physical, chemical and biological weathering to make a synthetic deterioration map according to aspects of damage, and estimate share as compared with surface area. Whole deterioration degrees are represented that physical weathering appeared exfoliation. Chemical weathering is black coloration and biological weathering of grey lichen, which show each highly deterioration degrees. According to deterioration degree by direction of stone Buddhas and Shrine, physical weathering mostly appeared by 39.1% on the southern part, and chemical weathering is 61.2% high share on the western part. Biological weathering showed 38.3% the largest distribution on the southern part. Therefore, it is necessary to try hardening for the parts with serious cracks or exfoliations, remove secondary contaminants and organisms through regular cleaning. Also necessary to make a plan to remove moisture of the ground which causes weathering, and estimate that need established and scientific processing through clinical demonstration of conservation plan that chooses suitable treatment.

Key Word : Stone Buddhas and Shrine, Lithic tuff, Rhyolitic tuff breccia, Biotite granite, Weathering, Synthetic deterioration map

1. 서론

석조문화재의 대부분은 자연환경에 노출된 상태로 전해 오면서 자연적 및 인위적인 요인으로 인해 원형이 손상된 경우가 아주 많다. 따라서 손상원인의 제어 및 소실 위험의 방지와 함께 원형보존의 필요성이 제기되고 있으며, 이를 위해 종합 손상도 평가에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁻⁴ 석조문화재의 훼손도 진단은 재질특성을 바탕으로 손상에 대한 원인, 과정 및 특징 등을 고려하여 손상상태에 대한 분석, 정량적 해석 및 평가를 통해 석조문화재의 지속적인 원형보존에 필요한 방법론을 제시해야 할 필수적인 과정이다.

화순 운주사 경내에는 석불 88구, 석탑 21기, 마애불 1구 및 외불 2구 등이 현존하여 고려시대 석조문화재의 아외전시장과 같은 중요한 사적지이다. 운주사의 발굴조사는 전남대학교박물관에 의해 1984년(1차)부터 시작되어 1987년(2차), 1989년(3차, 4차)까지 4차례에 걸쳐 190일간 이루어졌다. 석조불감에 대해서는 1995년 12월 13일 부분 해체작업을 실시하여 결실되었던 개석과 감실면석 등의 부재를 새로 보충 및 복원하여 1996년 5월 9일에 복원공사를 완료한 바 있다.⁵

운주사 석조불감은 아외에 노출되어 오랜 기간 기상환경 변화에 의한 풍화작용을 받아 부재의 균열 및 박리박락과 같은 물리적 훼손이 나타난다. 또한 주로 상부에서 하부로 흘러내리는 강수의 유동 흔적을 따라 광물의 분해

와 변질작용이 발생하여 암석의 조직, 색, 화학조성 등이 변화된 화학적 풍화현상이 중첩되어 있다. 한편 석조불감의 지붕과 북서쪽 면석 등에는 지의류 및 선태류의 생물학적 오염과 이차적 무기오염물로 피복되어 있다. 이와 같은 석조문화재 구성재질의 풍화와 보존에 대한 연구는 꾸준히 진행되고 있으며 국제적으로도 잘 알려져 있다.^{2,3,4,6}

운주사의 석조문화재에 대한 전반적인 보존과학적 현황에 대한 연구는 이미 보고된 바 있다.⁷ 이 연구에서는 운주사 석조불감을 대상으로 구성암석의 종류와 재질특성을 밝히고 손상유형별 정밀 진단을 통해 풍화상태 및 훼손도 평가를 수행하였다. 이 연구결과를 통해 운주사 석조불감의 손상정도에 대한 종합 진단과 보존처리를 위한 정밀 지침을 제공하였다. 이 결과는 운주사 석조불감의 안정적이고 장기적인 보존관리를 위한 중요한 자료가 될 것이며, 나아가 석조문화재의 보존관리 정책수립에 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

운주사 석조불감은 운주사 경내에서 북측의 7층 석탑과 남측의 원반형 연화탑 사이에 일직선상으로 위치한다.

전체적으로 목조건축의 양식을 변안하여 만든 팔각지붕의 형태로 지붕 아래에 직사각형의 감실을 만들었다(Figure 1A, 1B). 정상에는 두툼하고 넓은 석조 용마루가 수평으로 놓여져 있으며, 지붕 일부와 불상 밑 부분이 시멘트로 보수되어 있다. 지붕 낙수면의 앞면과 뒤면은 급경사를 이루고 있으나 양 측면은 다소 완만하다.

감실부분의 양 측면은 판석으로 막아 벽체를 구성하였고 전면은 좌우 벽체로 막아 감실을 구성하였다. 중앙은 열려 있는데 문설주 부분에 석문이 달렸던 흔적인 듯 상하로 구멍이 있다(Figure 1C, 1D). 불감 내부는 1매의 판석을 세워 공간을 2분하였으며, 석불좌상 2구의 불상이 모셔져 있는데, 특이하게도 남북으로 등을 서로 맞대고 있는 독특한 양식의 쌍배불이다.⁸ 불상을 새긴 수법은 그리 정교하지 않지만, 고려시대에 들어 나타난 지방적인 특징을 잘 보여주는 것으로 평가된다(Figure 1E, 1F).

2.2. 연구방법

이 석조불감의 재질특성을 파악하기 위해 정밀조사, 전암대자율 측정, 편광현미경 관찰(Nickon Eclipse E600W 편광/반사 겸용), X-선 회절분석(Bruker D8 Advance 고온 X-선 회절분석기) 및 주사전자현미경(JEOL JSM 6335F) 관찰을 하였다. 또한 구성암석과 석재의 추정산지 암석의 화학성분 및 풍화에 따른 화학 조성 변화를 파악하기 위해 주성분, 미량 및 희토류 원소를 분석하였다. 분석에는 X-선 형광분석기(XRF), 유도결합

플라즈마 분광분석기(ICP-AES), 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 중성자방사화분석기(INAA)를 이용하였다.

이 석조불감의 다양한 풍화훼손 유형을 장량적으로 평가하기 위해 실측도면을 바탕으로 물리적 및 구조적 풍화, 표면변색과 생물학적 풍화를 구분하여 풍화훼손지도를 작성하였다. 이를 이용하여 부재의 전체 면적에 대한 훼손유형별 점유율을 산출하였으며, 손상유형에 따른 정량적인 훼손 점유율을 계산하여 종합적인 손상도를 평가하였다.

3. 석재의 재료학적 특성

운주사 알대는 화산력 응회암으로 구성되어 있으며, 운주사의 석조문화재를 구성하는 암석도 응회암질암으로서 수 cm 내외의 화산력과 유문암질 화산회로 이루어진 화산력 응회암이 70% 정도를 차지한다. 석조불감을 구성하는 암석은 불감의 하단 지대석부터 상단의 용마루에 이르기까지 사면의 대부분이 암편질 화산력응회암으로 구성되어 있으며, 일부에서 유문암질 각력응회암이 혼재한다. 한편 사면의 지붕면석과 서측 일부는 보수 당시에 교체한 암석으로 흑운모 화강암을 사용하였다. 불감 안의 두 불상은 유문암질 각력응회암으로 구성되어 있으며 남측 불상에서는 암편질 응회암이 혼재한다.



Figure 1. Appearance of the Stone Buddhas and Shrine in Unjusa temple. (A) East, (B) West, (C) South and (D) North view of the stone Shrine. (E) Southern and (F) Northern view of the seated Buddhas.

3.1. 전암대자율

석조불감의 구성암석을 대상으로 전암대자율을 측정하였다. 전암대자율은 암석의 전체 자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로, 대자율 분포는 암석의 화학조성, 산화상태, 성인적 환경에 따라 달리하여 암석의 기재적 연구에서 가장 선행되어야 할 방법이다. 이 대자율 값은 석조문화재의 구성 재질의 동질성과 원산지 해석 및 석기와 토기의 구성재료에 대한 산지추정에도 적극적으로 응용되고 있다.^{3,4,6,9,10}

이 석조불감의 대자율 측정은 불감을 이루는 주요부재인 암편질 응회암 및 유문암질 각력응회암과 보수시 대체석으로 사용한 흑운모 화강암을 대상으로 모든 방위에서 측정하여 비교하였다. 측정은 암편질 응회암 113회, 유문암질 각력응회암 83회, 흑운모 화강암 81회를 실시하였다. 이 결과, 석조불감을 이루는 암편질 응회암의 대자율 측정값은 $0.01\sim 0.27(\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위를 보이며 평균 0.16이다(Figure 2A). 유문암질 각력응회암은 $0.01\sim 0.35(\times 10^{-3}$ SI unit)로 평균 0.15이다(Figure 2B).

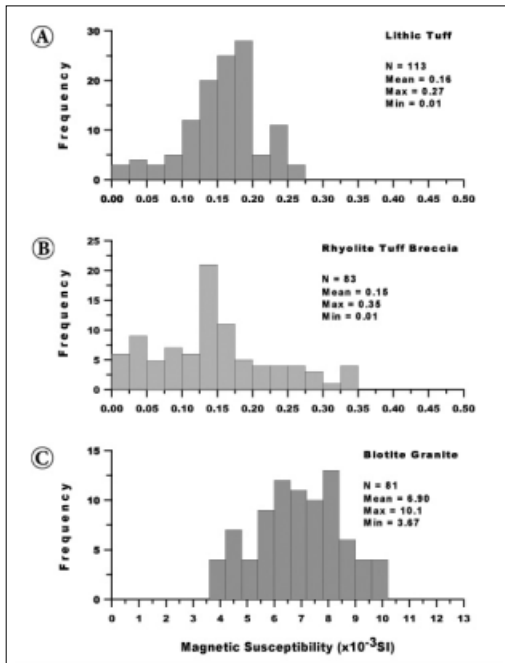


Figure 2. Diagram showing magnetic susceptibilities of the host rocks for the stone Buddhas and Shire. (A) Lithic tuff, (B) Rhyolite tuff breccia, (C) Biotite granite.

한편 지붕면석의 대체석인 흑운모 화강암은 $3.67\sim 10.10(\times 10^{-3}$ SI unit)의 범위에 평균 6.90을 보인다(Figure 2C). 전체적으로 대체석인 흑운모 화강암을 제외한 석조불감 구성암석의 대자율 값은 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 이 석조불감을 구성하고 있는 응회암질암들은 암석학으로 아주 유사한 진화과정을 경험한 동일 종류의 암석이며, 흑운모 화강암과는 서로 다른 성인을 갖는 암석이다.

3.2. 암석 및 광물학적 특징

이외조사를 통하여 육안적으로 관찰된 석조불감의 주요 구성암석은 담록색 내지 담회색을 띠는 암편질 응회암이다. 이 암석들은 유리질 기질과 석영, 장석, 흑운모 및 화산암편 등으로 구성되어 있으며, 중립질의 원마되지 않은 각력이 관찰된다. 석감의 기반부 구성암석에서는 퇴적암과 같은 수평적 유동층리 구조를 보여주기도 한다(Figure 3A).

이 암편질 응회암과 점이적으로 변하며 각력이 농집된 유문암질 각력응회암도 부분적으로 석조불감의 석재로 이용하였다(Figure 3B). 서측 면석에서는 약 5cm 두께의 페그마타이트 세맥이 관찰되며 일부 열기성 포회암도 있다. 지붕면석과 서측 일부 대체 부재인 흑운모 화강암은 담회색을 띠며, 주요 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 등이 있고 전반적으로 장석의 반상조직이 고르게 분포한다(Figure 3C).

석조불감 구성암석의 광물조성, 조직, 풍화에 의한 변질광물의 생성 및 상태를 관찰하기 위해 대표적인 암편으로 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 이 결과, 주요 구성부재인 암편질 응회암 및 유문암질 각력응회암의 구성광물은 석영과 사장석, 정장석, 흑운모 등의 조암광물과 미정질 또는 유리질 석기조직을 갖는 것으로 나타났다. 암편질 응회암은 유리질의 장석과 석영이 용결조직을 보여주며 침상 결정들이 산재해 있다(Figure 3D).

유문암질 각력응회암은 석영과 장석의 반성이 드물게 관찰되며 일부 장석은 풍화되어 건운모화 작용을 받았고 흑운모는 녹니석화 되었다(Figure 3E). 불감의 대체석인 흑운모 화강암은 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석 및 자철석과 같은 불투명 광물로 구성되어 있으며 등립질 입상조직을 나타낸다. 장석은 풍화되어 건운모 및 점토광물화

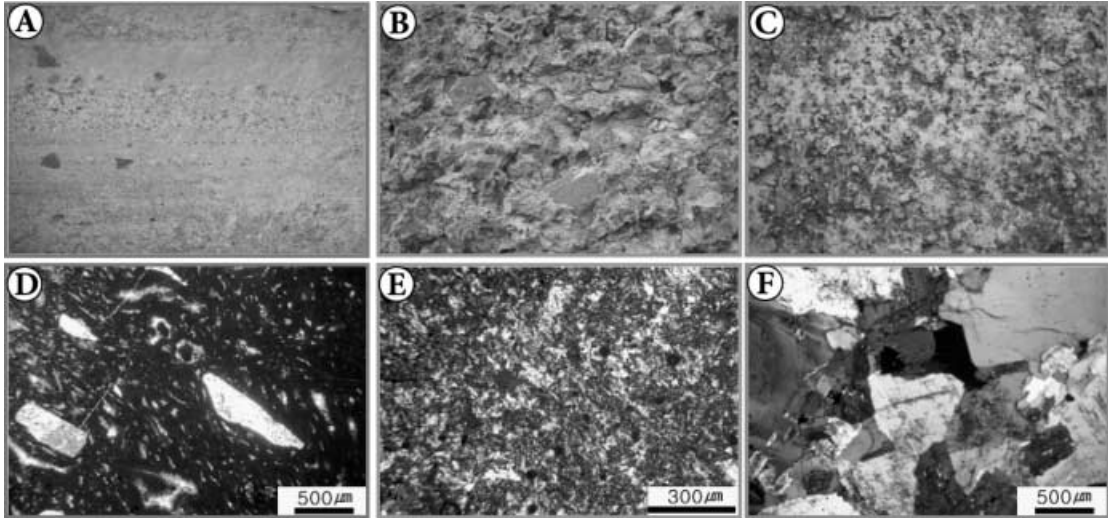


Figure 3. Lithology and microphotographs showing the major host rocks of the store Buddhas and Shire. (A, D) Lithic tuff, (B, E) Rhyolitic tuff breccia, (C, F) Biotite granite.

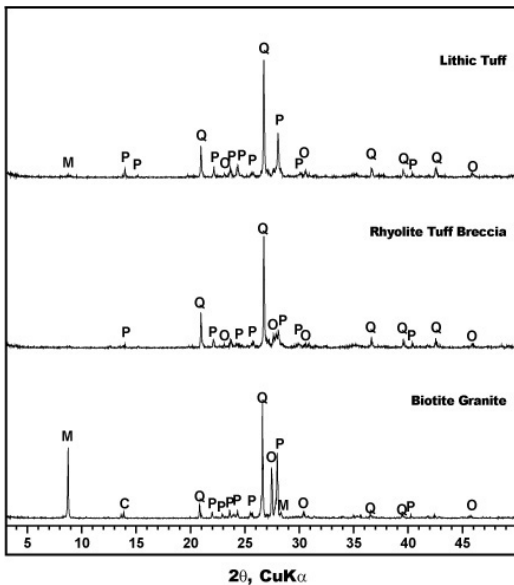


Figure 4. X-ray powder diffraction patterns showing the host rock of the store Buddhas and Shire. Q: quartz, O: orthoclase, P: plagioclase, M: mica, C: chlorite.

작용을 받았으며 흑운모는 벽개면을 따라 녹니석화 되었다(Figure 3F).

조암광물의 정밀한 동정을 위해 석조불감에서 탈락된 미세시편인 암편질 응회암, 유문암질 각력응회암과 흑운

모 화강암을 대상으로 시료의 일부를 분말화하여 X-선 회절분석을 수행하였다. 이 결과, 운모, 석영, 장장석, 사장석, 녹니석 등의 광물이 모든 시료에서 공통적으로 검출되었다(Figure 4). 이는 편광현미경을 통해 관찰된 구성암석의 조암광물과 일치하는 것이다.

3.3. 지구화학적 특징

석조불감의 구성암석을 대상으로 암석화학적 성질과 풍화에 의한 원소의 상대적 이동성을 해석하기 위해 암편질 응회암 5개, 유문암질 각력응회암 3개, 흑운모 화강암 2개 등 총 10개의 시료를 선정하여 화학분석을 실시하였다(Table 1). 이 결과, SiO_2 에 대한 알칼리 관계도에서 석조불감 구성암석은 모두 이알칼리(subalkaline) 계열의 영역에 도시되었다(Figure 5A). 이는 암석의 조성이 $Al_2O_3 > K_2O + Na_2O$ 의 관계를 나타내는 것이며, 조암광물로는 사장석과 운모가 많이 포함되어 있음을 의미한다.

알루미늄 함량을 기준으로 세분하기 위해 $A/CNK (Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O))$ 에 대한 $A/NK (Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O))$ 의 몰비 관계도를 적용하여 암석의 특징을 구분한 결과, 모두 과알루미나(peraluminous) 암질의 영역에 도시되며, A/CNK 에 대한 A/NK 의 비는 흑운모 화강암을 제외하면 정의 상관관계를 갖는다(Figure 5B). 이들은 암석이 풍화작용에 의하여 알칼리 성분의 소

실효과와 관련된 것으로서 사장석, 정장석 및 운모의 풍화에 따라 점토광물과 산화철 광물이 생성되었기 때문으로 판단된다.

다양한 풍화작용에 의한 원소들의 부화 및 결핍 정도와 거동특성을 근거로, 화성암의 풍화지수로 잘 알려진 CIA(chemical index of alteration)와 WP(weathering parker index)를 구하여 변화를 살펴보았다. 또한 풍화잠

재지수(weathering potential index: WPI)를 구하여 정량적인 풍화도를 산출하였다.^{11,12} 이 결과, 석조불감 구성 암석의 CIA와 WP에서 응회암류는 각각 52.09~59.36, 61.83~69.59을 보이며, 흑운모 화강암은 50.03~51.04와 64.87~66.49의 값을 보였다. WPI는 응회암류가 -3.78~5.02, 흑운모 화강암이 평균 14.3의 값을 나타냈다(Table 1).

Table 1. Contents of major (wt%), minor and rare earthelement (ppm) for rock properties of the Unjusa temple.

No.	Lithic tuf					Rhyolite tuf breccia			Biotite granite	
	UJL-1	UJL-2	UJL-3	UJL-4	WS-1	WJR-1	WJR-2	WS-3	WJB-1	WJB-2
SiO ₂	75.89	74.12	73.24	73.69	73.52	76.20	77.09	78.42	7.090	71.32
Al ₂ O ₃	12.37	12.44	14.04	13.64	13.80	12.78	12.73	10.79	13.83	14.92
Fe ₂ O ₃	1.09	1.18	1.35	1.44	1.72	1.12	1.34	0.82	2.91	2.43
MnO	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.02
MgO	0.26	0.40	0.46	0.41	0.46	0.16	0.16	0.09	0.90	0.57
CaO	0.40	1.45	0.67	0.50	0.27	0.68	0.92	0.09	2.47	2.32
Na ₂ O	3.87	3.20	1.96	3.71	2.09	3.16	3.03	0.63	3.43	3.72
K ₂ O	3.26	3.20	5.02	3.82	5.10	4.44	4.32	8.06	3.40	3.67
TiO ₂	0.15	0.15	0.17	0.22	0.22	0.06	0.07	0.12	0.39	0.45
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.03	0.05	0.07	0.03	0.03	0.03	0.16	0.15
LOI	1.52	3.20	2.66	1.70	2.44	1.04	1.09	1.09	0.50	0.59
Total	98.87	99.42	99.64	99.22	99.78	99.70	100.80	100.18	98.96	100.20
Ba	694	623	64	711	1017	839	770	1702	673	1340
Be	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2
Cs	4.2	10.3	11.5	12.9	9.8	1.7	2.1	2.9	5.2	1.6
Cu	3	2	6	8	9	3	10	8	3	4
Hf	2.9	2.6	3.8	4.0	4.1	2.4	2.3	3.0	4.5	4.6
Ni	<1	<1	3	46	22	<1	160	65	4	1
Pb	23	24	24	32	56	24	32	36	28	22
Rb	110	90	101	122	100	110	160	176	130	90
Sc	2.2	2.3	3.0	3.1	3.1	2.7	3.0	2.0	4.5	2.1
Sr	213	295	166	189	190	90	84	99	327	628
V	6	<5	11	9	18	<5	<5	13	38	25
Zn	37	32	51	46	64	36	40	27	62	70
Zr	115	109	130	131	144	62	66	108	158	189
La	29.1	34.2	33.9	71.6	17.3	23.1	23.1	15.2	53.7	46.7
Ce	45	53	54	88	35	39	43	26	88	75
Nd	14	18	18	39	9	10	11	9	25	32
Sm	2.2	3.1	2.9	7.5	1.1	2.9	3.1	1.4	5.4	4.3
Eu	0.5	0.6	0.6	1.8	0.5	0.5	0.5	0.3	1.0	0.9
Tb	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Yb	1.4	1.5	1.8	2.0	1.4	1.4	1.6	1.5	1.3	0.6
Lu	0.22	0.24	0.27	0.31	0.24	0.25	0.27	0.25	0.29	0.09
CIA*	53.80	58.71	55.03	59.36	52.26	53.20	52.09	52.90	50.03	51.04
WP**	65.85	63.91	69.59	64.68	61.83	69.22	64.37	66.87	66.49	64.87
WPI***	1.75	-2.68	1.68	-2.13	-3.78	3.74	5.02	3.55	15.90	12.70

Fe₂O₃: as total FeO, CIA*: chemical index of alteration by Nesbitt and Young (1982; 1984)^{11,12}, WP*: weathering Parker index, WPI***: weathering potential index by Nesbitt and Young (1982; 1984).^{11,12}

이는 대체적인 화강암을 제외한 석조불감의 모든 구성 부재가 화학적 풍화작용이 왕성하게 발생하고 있는 것을 지지하는 것이며 일부는 이미 완전 풍화단계에 진입하였음을 시사하는 것이다. 화학분석을 통해 얻은 주성분, 미량, 희토류, 호정 및 불호정 원소들을 표준화하여 거동특성을 살펴본 결과, 모든 응회암류들은 서로 별로 약간의 차이는 있으나 동일한 진화경로를 통해 생성된 물질임을 지지하였다.

3.4. 석재의 산지해석

석재의 산지해석은 원료물질의 공급지를 추적하여 문화재를 제작하는데 이용한 원료의 이동 경로를 추적하는 연구로서, 석조문화재의 보수와 복원에 대한 필요성이 대두되면서 현존하는 석조문화재의 부재와 동질암석을 찾는 원산지 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{9,13,14,15} 이 연구에서는 부재의 산지해석을 위해 석조불감 구성암석과 운주

사 일대 정밀 암석분포 조사를 수행하여 암석학적 분류, 구성광물의 종류와 함량, 조직과 조성의 정량분석, 지구 화학적 진화경향을 상세히 규명하였다.

이 결과, 석조불감에 사용된 암석과 운주사 주변에 분포하는 암석은 신출상태와 전암대자율, X-선 회절분석, 편광현미경적 특징 및 지구화학적 거동특성 등 모든 암석학적 특징이 유사한 경향을 보여 석조불감에 사용된 응회암질암 석재는 주변에 분포하는 암석을 원료로 제작하였을 가능성이 상당히 높은 것으로 나타났다. 운주사 일대에 대한 조사결과, 석조불감 서쪽 산기슭의 노두에서 채석흔적이 십여 군데 관찰되었으며, 채석한 석재의 운반과정을 볼 수 있는 미발 흔적도 나타난다(Figure 6).

4. 풍화훼손도 평가

4.1. 물리적 풍화

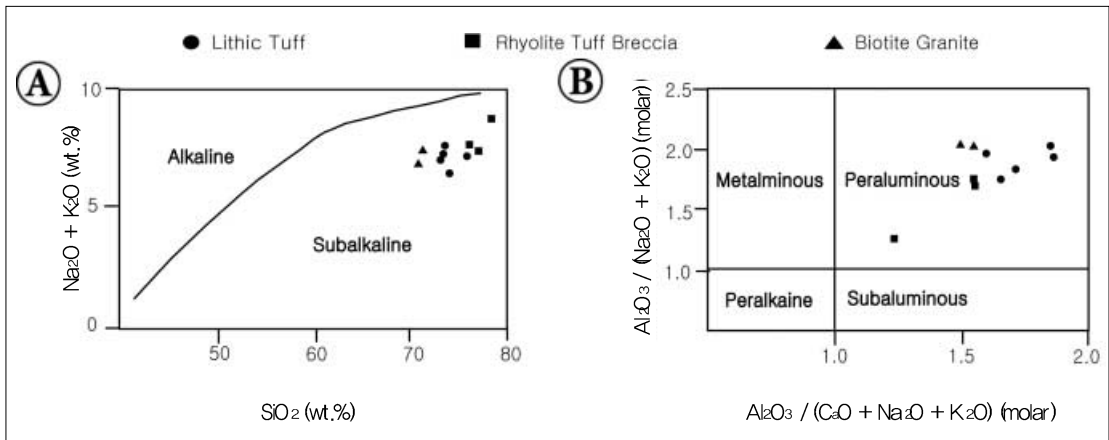


Figure 5. Geochemical characteristics for host rocks of the stone Buddhas and Shrine. (A) Diagram of $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 , (B) Diagram of A/CNK versus ANK.



Figure 6. The quarrying traces from the outcrop around the Unjusa temple.

운주사 석조불감의 사면은 전체적으로 표면마모가 심하게 나타나며, 각 면석이 접하는 부분에서는 균열 및 이격 현상들이 관찰된다. 이들은 우기에 강수의 통로가 되어 내부에 수분을 공급하여 유기물의 영양원을 제공하고 생물학적 풍화를 야기할 것이며, 나아가 화학적 풍화를 가속시키는 결과를 초래한다. 현재 석조불감의 갑석과 면석 사이 이격에는 철면고임 및 잡석이 끼워져 있으며, 문설주와 지붕면석 사이의 이격에는 황토 충전이, 동측과 서측의 지붕면석은 시멘트 몰탈이 채워져 있다.

석감의 표면에는 요철풍화와 박리박락 및 탈락과 같은 암석의 결실이 나타난다(Figure 7A). 요철풍화는 강수가 흐르는 수직방향으로 발달되어 나타나며 이를 따라 남측 중석 우측면의 일부가 삼하게 탈락되어 있다. 서측 지대석과 면석 하단은 양파껍질처럼 벗겨져 간간 박리박락이 두드러지게 발생하였으며, 이와 같은 현상은 불상의 구성 암석과 면석 및 중석 등 모든 부재에서 흔하게 나타난다(Figure 7B). 또한 석감의 지대석 모서리 탈락과 부재의 균열 및 세면화 현상이 흔하게 관찰된다(Figure 7C).

석감 내부의 쌍배불상은 외부 환경에 직접적으로 노출되어 있는 석감의 표면보다 물리적 풍화정도는 적은 편이나, 균열 및 이격, 탈락, 박리박락 현상들이 나타나며, 전체적으로 표면마모가 심하다. 이는 암편질 응회암의 암상에 따라 나타나는 자연적 풍화작용이기도 하다. 두 불상의 코는 시멘트로 보수되어 있으며, 불상과 갑석의 이격 발생 부위는 남측은 잡석으로, 북측은 수직접합이 이루어져 있다.

4.2. 화학적 풍화

운주사 석조불감은 화학 및 광물화적인 풍화작용으로

인하여 풍화생성물이 표면에 침착되어 있으며 부분적으로 원암의 조직과 색이 변질되었다. 석조불감의 사면에서는 황갈색 변색이 관찰되는데, 이는 벽면석에서는 수직방향으로 기단부에서는 수평으로 광범위하게 나타난다. 특히 불감의 사면 중에서도 북측과 동측의 중석에서 심하다(Figure 8A). 쌍배불의 두상에서도 두드러지게 나타나며 석감과 마찬가지로 남측보다 북측의 불상에서 잘 나타난다. 석조불감에는 부재 사이의 균형을 맞추기 위해 철편이 삽입되어 있으며, 이들이 강수와의 반응에 의해 산화되면서 암석 표면이 적갈색으로 변색되어 있다. 이는 석조불감 사면의 갑석과 벽면석 사이 이격에서 관찰된다.

또한 석조불감 표면에서는 광범위하게 흑색 변색이 관찰된다. 이는 상부로부터 흘러내려오는 강수와 함께 미세토양과 먼지 등의 오염물 침착에 의한 것과 지의류 및 조류의 고사체에 의한 것, 산화철 및 산화망간에 의한 것 등이다. 석조불감의 기단석부터 갑석은 암석 내 광물에 의한 흑색 변색이 수직방향으로 나타나며, 문설주부터 용마루는 전체적으로 지의류 및 조류의 고사체와 먼지 등에 의한 흑색 변색이 흔하다. 한편 벽면석에서는 위의 모든 작용이 중첩된 흑색 변색이 나타난다(Figure 8B).

대부분의 변색현상은 층위로는 벽면석과 지붕면석, 방위로는 서측과 동측에서 높은 점유율을 보인다. 쌍배불의 남측 불상에서는 입술과 왼쪽 어깨에서 흘러내려오는 옷주름 상부에서 관찰된다. 북측 불상에서는 가슴부위에 가지런히 모이고 있는 두 손과 삼도가 표현된 목, 두상의 좌측 일부에서 수직적으로 흑색 변색이 나타난다. 흑색 변색도 황갈색 변색과 마찬가지로 남측보다 북측 불상에서 우세하다.

이 석조불감에서는 일부 이격과 공동을 메우기 위해 수지 및 시멘트 몰탈을 사용하였으며, 동측과 서측 지붕면



Figure 7. Representative physical weathering of host rocks for the store Budtlhas and Shire. (A) Northern under base rocks show partly fractured and exfoliated. (B) Rounded exfoliation developed on surface of the Buddha store. (C) Eastern flat stones show fractured and fragmentation.

석 중앙의 시멘트 몰탈이 충전된 부분에서는 백화현상이 나타난다(Figure 8C). 그러나 두 불상에서는 백화현상이 보이지 않는다. 이는 두 불상이 석감 내부에 위치하고 있어 강우에 의한 수분의 영향을 직접적으로 크게 받지 않기 때문으로 판단된다.

4.3. 생물학적 훼손

이 석조불감은 사면의 전반에 걸쳐 균류, 조류, 지의류 및 선태류들이 피복되어 회백색, 회색, 암회색, 연녹색, 황갈색, 진녹색 등의 산출상태를 보이며, 특히 회색 고착지의류의 분포가 높게 나타난다. 남측과 북측의 자봉면석은 선태류에 의해 피복되어 있으며, 북측과 서측의 갑석에는 회색 염상지의류와 연녹색 고착지의류가 관찰된다(Figure 9A). 사면의 면석에서는 남조류가 강수의 흐름을 따라 수직방향으로 나타나고 있다(Figure 9B). 북측과 동측의 지표와 기단부 부재의 이격 사이에는 초본식물이 자생하고 있다. 이와 같이 생물체로 피복된 부재는 생물의 자생에 따른 근압으로 인해 부재의 균열이 진행되기도 한다.¹⁶

석조불감 내부 남측 불상 뒤편의 벽면석에서는 주로 회

색 고착지의류가 분포하며, 일부 연녹색 고착지의류도 관찰되었다. 북측 불상에서도 회색 고착지의류와 연녹색 고착지의류의 분포가 나타난다. 이는 불상 뒤편의 벽면석과 두상, 목, 양측 팔부분과 허리부위까지 넓은 범위로 관찰되어 남측보다 두드러지게 확인된다. 또한 내부 바닥에는 각종 동물의 배설물이 산재한다.

이 석조불감 구성암석의 생물학적 풍화 정도를 확인하고자 주사전자현미경 관찰을 수행하였다. 이 결과, 암석 표면으로부터 약 1cm 깊이의 내부에서도 유기물의 포자가 생장하여 밀집되어 있는 모습이 나타났다. 또한 유문 암질암의 풍화작용에서 생성된 점토광물들이 유기물의 포자 및 뿌리조직과 함께 자생하는 것도 관찰되었다(Figure 9C).

4.4. 훼손도 정량평가

운주사 석조불감의 동서남북 면과 쌍배불상에 대한 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화상태를 종합하여 훼손지도를 작성하였다. 이 손상유형별 훼손지도와 손상부위의 점유율 산정은 이 석조불감의 종합 훼손정도를 정량적으로



Figure 8. Representative chemical weathering of host rocks for the stone Buddhas and Shrine. (A) Northern under base rocks show yellowish brown discolorations developed on surface, (B) Western wall rocks show dark discolorations developed on surface, (C) Western roof rocks show white discoloration.



Figure 9. Representative biological weathering of host rocks for the stone Buddhas and Shrine. (A) Green foliose covers the wall rock. (B) Surface green discoloration by green algae. (C) Scanning electron microscope image of organic rootlets grown into the host rock.

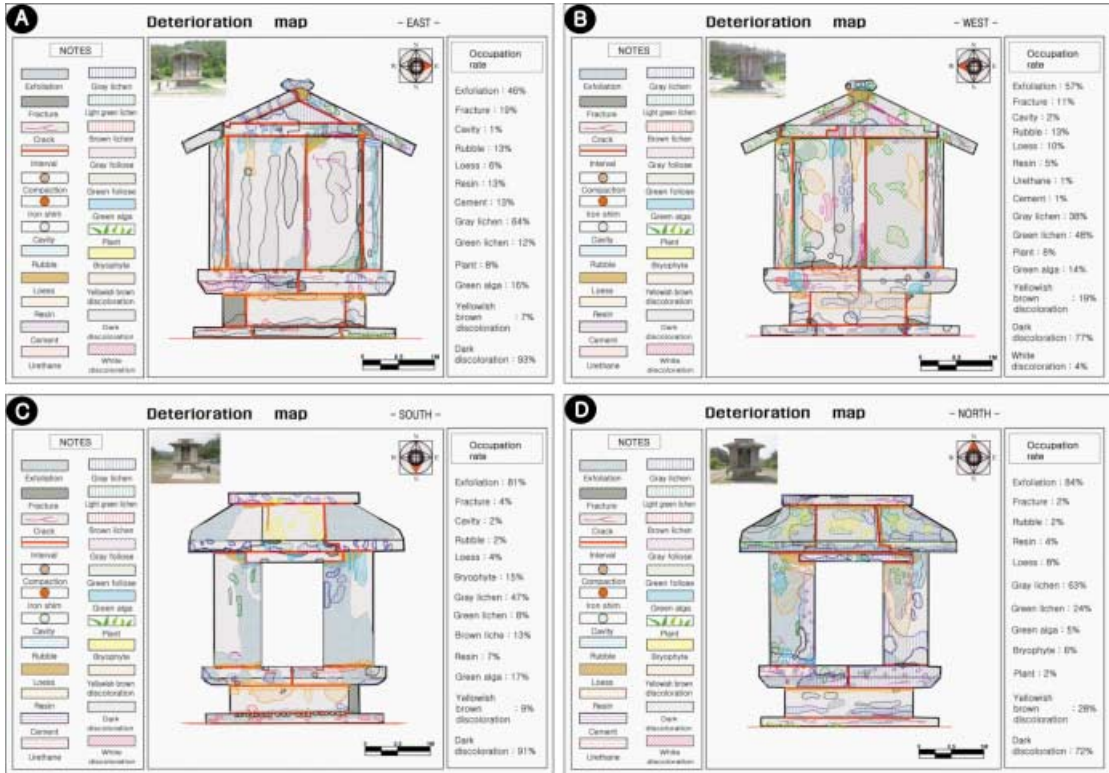


Figure 10. Synthetic deterioration maps of the Stone Shrine. (A) East, (B) West, (C) South and (D) North view for deterioration details of the stone Shrine.

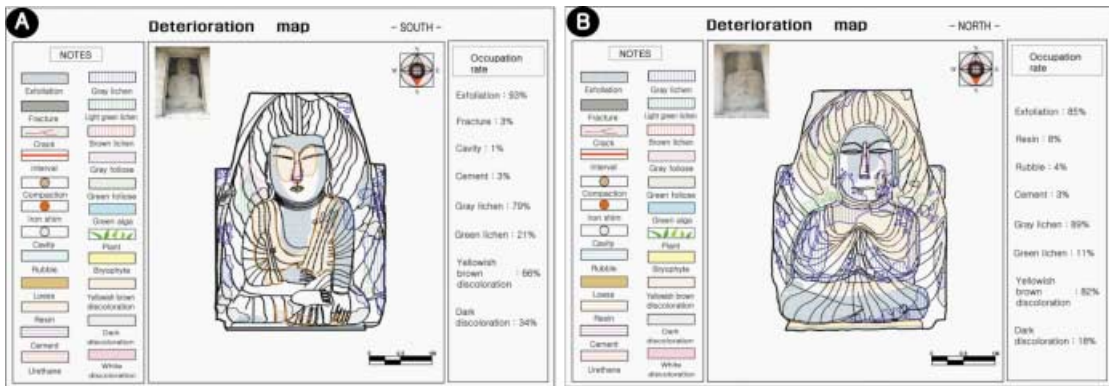


Figure 11. Synthetic deterioration maps of the Stone Buddhas. (A) Southern and (B) Northern view for deterioration details of the seated stone Buddhas.

평가하는데 매우 유용하게 사용된다. 이와 같은 석조문화재의 훼손지도와 훼손율의 산정기법은 이미 국내외적으로 보고된 바 있으며, 이 연구에 적용된 방법도 이를 응용한 것이다.¹⁷⁻¹⁹

이 종합 훼손지도를 기준으로 각각의 손상유형에 대한 점유면적과 분포를 알아보기 위해 표면적 대비 손상비율을 산출하여, 전반적인 훼손유형별 점유율 순위를 석감과 불상의 방위를 기준으로 비교해 보았다. 이격과 균열 및

고임은 면적을 계산하기에 어려움이 있어 제외하였다. 석조불감의 물리적 풍화의 점유율을 도시한 결과, 전체 면적 대비 박리박락이 차지하는 비율이 평균 18.5%로 다른 훼손율과 비교했을 때 가장 높은 점유율을 보였다. 특히 석감의 남측과 북측에서 31.6%와 27.9%로 높은 훼손율을 보인다(Figure 10).

보수에 따른 수지 충전 부위의 점유율은 평균 1.5%를 차지하며, 석감의 동측과 남측에서 각각 2.8%, 2.7%의 훼손율을 보여주고 있다. 부재탈락은 평균 1.5%로 나타나며, 석감의 동측에서 4.0%로 가장 높다. 석조불감의 물리적 훼손율을 종합하여 보면, 석감의 남측과 북측에서 높은 훼손율이 나타나고 있다. 또한 석감과 불상으로 나누어보면 불상이 석감보다 9.2% 정도의 낮은 훼손율을 보인다(Figure 11). 이는 불상이 내부에 위치해 있어 기상환경과 풍식작용 등을 직접적으로 받지 않았기 때문으로 보인다.

석조불감의 화학적 풍화에 대한 점유율은 흑색 변색이 평균 25.2%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 13.2%의 황갈색 변색, 0.42%의 백화현상 순이다. 흑색 및 황갈색 변색은 동서남북 방위를 걸쳐 높은 훼손율을 보이며, 흑색 변색은 석감의 서측면에서 47.3%로 가장 높게 나타난다. 황갈색 변색의 경우 불상에서는 북측 불상이 39.8%로 높게 나타나며, 석감에서는 흑색 변색과 마찬가지로 서측면에서 11.4%로 높았다(Figure 10, 11).

백화현상은 석감의 서측면에서만 나타나며 강수의 유동흔적을 따라 수직으로 분포한다. 한편 남측과 북측 불상에서는 각각 66% 및 82% 정도의 황갈색 변색 점유율을 보이며 북측 불상에서 두드러지게 나타난다. 석조불감의 화학적 풍화를 종합하면, 표면변색의 방위로는 석감의 서측과 불상의 북측에서 높은 훼손율이 나타나고, 훼손 양상으로는 모든 방위에서 흑색 변색이 높은 점유율을 보인다(Figure 10, 11).

생물학적 훼손유형에 대한 점유율 산출 결과, 66.8%로 화색 고착지의류가 상대적으로 높게 나타나며, 연녹색 고착지의류, 녹색 엽상지의류 순으로 분포한다. 훼손유형에 대한 점유율을 방위별로 살펴보면, 화색 고착지의류는 불상과 석감의 북측에서 18.1%와 22.7%의 점유율로 다른 면보다 상대적으로 두드러지게 나타난다. 연녹색 고착지의류와 화색 및 녹색 엽상지의류는 석감의 서측과 북측에서 높은 점유율을 보인다. 녹조류는 1.9~2.7%에

이르기까지 석감에서만 보이며, 선태류는 1.7%, 2.4%로 석감의 남측과 북측의 지붕면석에서만 나타난다.

초본식물은 석감의 동측과 북측에서 각각 1.0%, 0.7%의 점유율로 분포한다. 불상에서는 화색 지의류의 점유율이 가장 높게 나타나며, 생물학적 풍화는 북측이 남측보다 10% 정도 높은 것으로 보인다. 석조불감의 생물학적 풍화를 종합해보면, 내부와 외부에서 모두 북측면의 점유율이 높게 나타났으며, 특히 석감 외부의 북측면은 다른 방위들에 비해 2배 이상 높게 나타난다. 이는 북측면이 상대적으로 일사량이 적고 수분 유지시간이 길어 생물들의 생장을 촉진시키는데 영향을 미친 것으로 판단된다(Figure 10, 11).

5. 보존과학적 고찰

응회암은 화산기원 쇄설성 퇴적암의 일종으로 화산재와 암편 및 각력 등이 고화되어 생성된 암석으로서 암질이 상당히 불균질하고 물성이 악하여 비교적 풍화에 취약한 암석이다. 운주사 석조불감과 같이 응회암질암으로 구성된 석조문화재의 손상상태와 메커니즘에 대하여는 이미 잘 알려져 있다.^{20,21} 이 석조불감은 1995년 지붕면석의 일부 부재를 화강암으로 대체하면서 장기적 안정성에 대한 검토가 필요하게 되었다.

현재 이 석조불감의 전체 하중은 56.62t이며, 상부 화강암 부재가 13.68t, 하부의 응회암 부재는 39.42t으로 계산되었다. 특히 기단부의 지대석과 기단석은 상부의 하중을 받기에는 무리가 있을 정도로 취약해 보이는

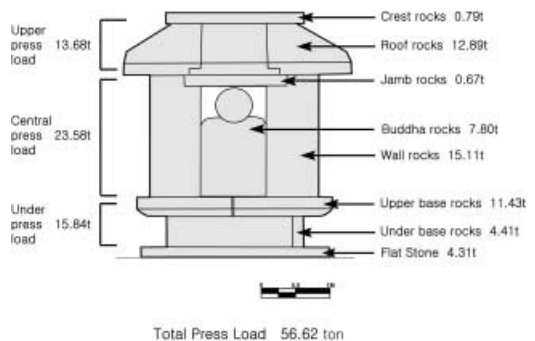


Figure 12. Total press load of the Stone Buddha's and Shire.

것으로 보아(Figure 12), 이에 대한 중장기적인 대안이 필요할 것으로 판단된다. 각 부재의 무게와 총 하중은 이미 보고된 바 있는 이 석조불감의 정밀실측 자료를 바탕으로 응회암과 화강암의 평균 비중을 적용하여 산출한 것이다.²²

이와 같이 석조불감은 편하중과 구조적 불균형에 따라 부재의 이격 및 균열, 기단부의 수평적 불균형 현상들이 관찰된다. 따라서 상륜부의 화강암 부재를 석조불감의 원 부재와 유사한 응회암으로 교체해야 할 것이다. 또한 야외에 노출되어 있는 많은 석조문화재들과 마찬가지로 빗물, 대기오염, 습기, 기온변화 등 자연환경의 직간접적인 영향과 공사, 낙서 등의 인위적인 영향을 받아 변색, 차별화, 박리박락, 균열, 생물오염 등 다양한 풍화양상을 나타내고 있으며 지금도 진행되고 있다.

이 석조불감의 가장 큰 피해는 조류, 지의류 및 선태류 등의 유기오염물에 의한 생물의 착생과 변색이다. 지의류와 선태류처럼 암석 표면에 깊이 뿌리를 내리고 부착생활을 하는 생물은 증류수를 이용한 습식세정으로는 제거에 어려움이 많아 고온스팀 세척기를 사용하기도 한다. 그러나 이와 같은 유기오염물은 최근까지 석조문화재에 적용되어 왔던 건식 및 습식 세정법을 적용하면 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.^{2,19,24}

이 석조불감에 나타나는 무기오염물은 황갈색 수산화철, 암흑색 망간수산화물, 백색의 석회진류물로 간단한 세정으로 제거가 가능한 수용성 무기오염물질이 대부분이다. 이는 증류수를 이용한 세정만으로도 석조불감의 미관뿐만 아니라 암석내부의 훼손방지도 효율적이다. 그러나 표면산화 및 적갈색 침전물과 피복물질에 대해서는 석조문화재 세정용 유기용제의 사용이 불가피 할 것으로 보인다. 이와 같은 오염물의 제거방법은 이미 잘 알려져 있으나 직접적인 처리에 앞서 부작용을 최소화하기 위한 적용실험이 필수적이다.^{2,23,24}

이 연구과정에서 운주사 석조불감 내외부에 지동온습도 로거를 설치하여 미기상환경 모니터링을 실시한 결과, 석조불감 내부의 상대습도는 연중 높은 고습도 환경을 유지하고 있었다. 특히 여름철에 높은 강수량과 기온의 영향으로 100%에 달하는 고습도가 유지되었다. 또한 겨울철에도 강수에 의한 영향으로 높은 습도 환경을 나타냈다. 이러한 높은 습도환경과 기온은 표면 결로현상을 야기할 것으로 나타났다.

결로현상은 상대습도와 온도와의 열역학적인 상관관계에 의해 제어될 수 있다. 그러나 석조불감 내부의 습기를 근본적으로 저감하는 방안으로 천정과 벽면석에서 발생하는 누수를 방지하는 시설이 설치되어야 하며, 환경변화에 대한 장기적인 모니터링과 함께 표면의 수분 유지시간을 단축시킬 수 있는 보존환경의 조성이 필요한 것으로 나타났다. 이와 같은 운주사 석조불감의 보존환경에 대한 연구결과는 차후에 보고하고자 한다.

6. 결론

1. 운주사 석조불감은 쌍베불과 감실을 갖추고 있는 아주 독특한 양식을 보이는 석조문화재로서, 구성암석은 회백색의 유리질 조직을 갖는 화산력 응회암류로 주로 암편질 응회암과 유문암질 각력응회암이다. 전체적으로 담록색 내지 담회색의 밝은 색조를 띠는 기질과 석영, 장석, 흑운모 등의 반정 및 다양한 종류의 암편으로 구성되어 있다. 한편 지붕면석의 일부는 석조불감의 보수 과정에서 흑운모 화강암이 혼용되었다. 이 석조불감은 총 47매의 암석으로 구성되어 있으며, 총 하중은 약 56.6톤이다.

2. 석조불감 구성부재의 전암대자율 값은 암편질 응회암이 평균 $0.16(\times 10^{-3}$ SI unit), 유문암질 각력응회암이 평균 $0.15(\times 10^{-3}$ SI unit)로 동일한 분포를 보이는 티탄 철석계열에 해당한다. 흑운모 화강암은 평균 $6.90(\times 10^{-3}$ SI unit)으로 지철석계열에 속한다. 석조불감 구성암석은 K-부화 영역에 속하는 이알칼리 계열의 특징을 보여주고 있으며, 과알루미나암질 화성암의 영역에 속한다. 또한 칼크-알칼리 계열 마그마의 분화 특징을 보인다. 이들 응회암질암의 화학적 풍화지수는 52.1~59.4이나, 대체적인 화강암은 비교적 낮은 50.0~51.0을 보인다.

3. 석조불감은 모든 부분에서 표면미모와 박리박락이 발달되어 있으며, 남측 감석 일부는 탈락되어 있다. 또한 부재와 부재 사이에는 균열 및 이격이 발생되어 이를 수지접합, 잡석 채움, 철펠고임, 시멘트 및 황토로 충전하였다. 불감의 사면에는 적갈색 및 흑색 변색과 백화현상이 나타난다. 적갈색 오염물은 산화철 또는 수산화철이며, 흑색 오염물은 산화철과 산화망간 또는 식물 고사체의 혼합물이다. 석조불감의 표면에는 조류에서 지의류 및

선태류와 고등식물에 이르기까지 다양하게 성장하며 상대적으로 내부보다는 석감 외벽면석에서 두드러지게 나타난다.

4. 전체적인 손상정도를 평가하기 위해 정밀 진단을 바탕으로 종합훼손지도를 작성하여 표면적 대비 점유율을 산출하였다. 물리적 풍화는 석감의 남측면이 39.1%의 점유율로 가장 높으며 박리박락이 두드러지게 나타난다. 화학적 풍화는 흑색 및 황갈색 변색, 백화현상이 순으로 나타나며, 석감의 서측 면에서 61.2%의 높은 점유율을 보인다. 생물학적 풍화는 회색 지의류가 압도적으로 높으며, 석감 북측 면이 38.3%로 가장 높은 점유율을 보인다. 전체적으로 석조불감의 북측과 서측에서 풍화등급이 가장 높게 나타난다.

5. 운주사 석조불감은 상부 부재의 하중으로 인한 불균형을 해소하기 위해 흑운모 화강암의 자봉면석을 원부 부재와 동일한 응회암으로 교체해야 하며, 오염이 심한 구성 부재의 세정이 필요하다. 또한 균열 및 박리박락이 심한 부재의 접합 및 보강이 선행되어야 하며, 석조불감 내부의 결로를 저감하기 위해 천정과 면석의 누수방지시설 등과 같은 내부 습기를 근본적으로 차단하는 방안과 표면의 수분 유지시간을 단축시킬 수 있는 환경제어 방안이 마련되어야 한다.

사 사

이 논문은 2007년도 교육인적자원부 학술연구조성사업비로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-551-C00001)을 받아 연구되었고, 또한 공주대학교 안식년연구사업의 일환으로 수행되었음을 명기하며 이에 감사한다.

참고문헌

1. Fitzner, B. and Heinrichs, K., "Damage diagnosis on stone monuments—weathering forms, damage categories and damage indices," In Prikryl, R. and Viles, H.A(ed.), *Understanding and managing stone decay*, Proceeding of the International

- Conference "Stone weathering and atmospheric pollution network(SWAPNET 2001)", *The Karolinum Press, Charles University in Prague*, p11-56 (2002).
2. Lee, C.H., Choi, S.W. and Suh, M., "Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea." *Geotechnical and Engineering Geology*, 21, p63-77 (2003).
3. Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W., "Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea." *Environmental Geology*, 47, p547-557 (2005).
4. 이찬희, 이명성, 서만철, "영주 가흥리 마애삼존불상의 풍화특성과 불연속면의 안전성 해석." *지질학회지*, 41, p401-413 (2005).
5. 전남대학교 박물관, "운주사 종합학술조사 보고서." *전라남도 화순군*, p418 (1991).
6. Lee, C.H. and Yi, J.E., "Weathering damage evaluation of rock properties in the Bunhwangsa temple stone pagoda, Gyeongju, Republic of Korea." *Environmental Geology*, 52, 1193-1205 (2007).
7. 김사덕, 이찬희, 최석원, 신은정, "운주사 석조문화재의 보존상태와 보존방안에 대한 연구." *문화재*, 37, p285-307 (2004).
8. 문화재청, "문화재 상세정보, 보물 제797호 운주사석조불감." www.ocp.go.kr (2007).
9. 좌용주, 이상원, 김진섭, 손동운, "경주 불국사와 석굴암의 석조 건축물에 사용된 석재의 공급지에 대하여." *지질학회지*, 36, p335-340 (2000).
10. Uchida, E., Ogawa, Y., and Nakagawa, T., "The stone material of the Angkor monuments, Cambodia: the magnetic susceptibility and the orientation of bedding along of the sandstone." *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 93, p411-426 (1998).

11. Nesbitt, H.W. and Young, G.M., "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites." *Nature*, 299, p715-717 (1982).
12. Nesbitt, H.W. and Young, G.M., "Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations." *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 48, p1523-1534 (1984).
13. 이찬희, 이명성, "우리나라 석조문화유산의 현황과 보존방안." *한국구조물진단학회지*, 9, p13-21 (2005).
14. 양희제, 이찬희, 최석원, 이명성, "익산 미륵사지석탑 구성부재의 암석학적 특징과 석재의 원산지 해석." *지질학회지*, 42, p.293-306 (2006).
15. 이찬희, 김영택, 이명성, "부여 정림사지 오층석탑 구성암석의 원산지 추정." *지질학회지*, 43, p183-196 (2007).
16. Warscheid, T. and Braams, J., "Biodegradation of stone: a review." *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, p343-368 (2000).
17. Fitzner, B., "Documentation and evaluation of stone damage on monuments." *The 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, Sweden*, p677-690 (2004).
18. 조영훈, 이찬희, 전성원, "증평 남하리사지 마애불상군의 재질특성과 훼손도 평가." *지질학회지*, 43, p501-515 (2007).
19. 이선명, 이명성, 조영훈, 이찬희, 전성원, 김주욱, 김선덕, "안성 청룡사삼층석탑의 풍화훼손도 진단과 보존처리." *자원환경지질*, 40, p661-673 (2007).
20. Tamer, T. and Burak, S., "Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument." *Engineering Geology*, 68, p201-223 (2003).
21. Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A., Malpas, J., "Re-assessment of chemical indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong." *Engineering Geology*, 63, p99-119 (2002).
22. 송암엔지니어링(주), "화순 운주사 석조불감, 원형다층석탑 풍화상태 진단조사 보고서." *전라남도 화순군*, p1-173 (2005).
23. 조연태, 김창석, 강대일, 이명희, "회암사지 선각왕사비 보존처리." *회암사지 선각왕사비 보존. 국립문화재연구소*, p11-41 (2001).
24. Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J.Y., "Deterioration assessment and conservation of a heavily degraded Korean stone Buddha from the 9th Century." *Studies in Conservation*, 51, p305-316 (2006).