일본 히로시마현 마에화령석지장(磨崖和靈石地藏)의 해수 침수에 의한 풍화특성

이선명¹ | 이명성 | 전유근 | 이재만 | 森井順之*

국립문화재연구소 보존과학연구실, *동경문화재연구소 보존수복과학센터

Weathering Characteristics according to Seawater Immersion of the Magai Wareishi Jizo (Buddhist Statue Carved on Rock Surface) in Hiroshima, Japan

Sun Myung Lee¹ | Myeong Seong Lee | Yu Gun Chun | Jae Man Lee | Masayuki Morii*

Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

*Center for Conservation Science and Restoration Techniques, National Research Institute
for Cultural Properties, Tokyo, 110-8713, Japan

¹Corresponding Author: choro13@korea.kr, +82-42-860-9261

초록 마에화령석지장은 해안가에 인접해 있고 해수에 의해 주기적으로 일정 부분이 침수되는 특수한 입지적 조건에 있다. 마에불을 구성하는 암석은 중립질 또는 조립질을 띠는 흑운모화강암으로 내구성이 강한 편이나, 암석 내부에 침투한 염용액과 주변 환경과의 복잡한 상호작용에 의해 구성암석의 색과 강도 및 내구성 등 물성이 변화된 상태이다. 마에불을 이루는 암석은 염(NaCl)결정화 작용에 의한 표면층 박리박락이 심각하다. 박리박락(14.6%)은 해수의 주요 경계면을 중심으로 대기에 상시 노출되는 상부에 집중되어 있다. 반면, 해수에 의해 주기적으로 침수되는 암괴 하부는 오염물이 침착되어 흑화층을 나타내며 이와 함께 갈색변색과 생물오염이 중첩된 상태이다. 표면 오염 및 변질은 흑색 변색(29.2%), 황색 변색(14.1%), 갈색 변색(4.4%), 녹색 변색(2.9%)의 순으로 높은 훼손율(50.5%)을 나타냈다. 또한 해수면을 경계로 상부가 해수에 침수되는 하부보다 초음파 속도가 낮고 편차가 커 많은 물성 변화가 있었음을 알 수 있으며, 특히 해수 침투 경계면의 표면 물성이 취약함을 확인하였다.

중심어: 마에화령석지장, 흑운모화강암, 해수 침수, 염 풍화, 박리박락, 흑화현상, 풍화특성

ABSTRACT Magai Wareishi Jizo (Buddhist statue carved on rock surface) is close to shoreline and a part of rock block is periodically immersed by seawater. Rock material of the Wareishi-jizo statue is composed mainly of medium or coarse-grained biotite granite and very durable. However, physical properties of the rock have been changed according to the complex interactions of the salt solution and surrounding environment. Exfoliation of the rock surface is a serious condition by salt crystallization. Exfoliation (14.6%) is concentrated on the upper part of the rock block with mainly boundary of seawater as the center. On the other hand, lower part of the rock block show black layers by contaminants deposition. In addition, brown discoloration and biological contaminants is overlapped. Rock surface show high discoloration rate of 50.5% (black discoloration, 29.2% > yellow discoloration, 14.1% > brown discoloration, 4.4% > green

discoloration, 2.9%). Upper part of the rock block had a lot of change in the physical properties than lower part that is immersed by seawater. In particular, surface properties of the rock block was very weak state at the boundary surface of seawater permeation.

Key Words: Magai Wareishi Jizo, Biotite granite, Seawater immersion, Salt weathering, Exfoliation, Blackening, Weathering characteristics

1. 서 론

마애화령석지장(현 지정 중요문화재)은 일본 히로시마 현 미하라시 인근에 있는 사기섬에 위치하는 것으로, 지장 신앙의 전파 등 당시 문화교류 관계를 유추할 뿐 만 아니라 미술사적으로 조각기법이 섬세하고 아름다워 인근에서 조성된 지장상의 원형으로 평가되고 있다. 그러나 해안가에 인접해 있는 이 마애불은 조차에 의해 주기적으로 해수에 침수되어 염풍화 작용이 가중된 상태이고 침수부분과 비침수 부분의 풍화양상에 차이를 보이고 있다.

석조문화재는 대부분 지표환경에 오랜 기간 동안 노출된 상태로 지형 및 기후환경에 의해 구성암석의 색상, 강도, 내구성 등이 변화된다. 이는 구성암석의 광물 종류에 따라 변화양상을 달리하며 동질의 암석이어도 그것이 위치한 환경에 의해 다른 풍화작용을 경험하게 된다. 이러한 풍화현상은 우리 주위에서 끊임없이 일어나고 있는 현상이지만 장기간에 걸쳐 서서히 일어나므로 그 심각성을 간과하기 쉽다. 특히 탑, 부도와 같은 석조 건조물에 비해 자연암반 및 암괴에 조각되어 있는 마애불의 경우 조성위치에 따라 접근이 어려울 수 있으며 환경적 제어 및 관리가 어려워 우리가 인식하지 못한 사이 문화유산에서 그 일대 지형의 일부로 소진될 수 있다.

따라서 마애불이 조각된 암반의 구조적 안정성 분석 및 표면의 풍화훼손 상태를 정량적으로 진단하는 기술을 개발하고 적용한 많은 연구 결과들이 보고되고 있다^{1,2,3,4}. 최근에는 풍화와 주변 환경과의 상관관계를 해석하여 손상원인을 규명하는 연구도 상당히 진전되고 있다^{5,6,7}. 그러나 지금까지의 많은 연구 결과들은 대부분 일반적인 대기환경에 하에 노출된 석조 문화재를 중심으로 진행된 것으로, 침수피해 또는 석조 문화재 손상에 가장 유해한 요인으로 고려되어 온 염 풍화에 대한 연구는 실험연구 위주이거나 제한적인 암종을 대상으로 한 연구 외에 다양한 사례연구가 미흡한 실정이다^{8,9,10,11}.

따라서 이 연구에서는 해수에 의해 주기적으로 침수되는 마애화령석지장을 대상으로 구성암석의 재질특성을 파악하고 표면 손상도 및 물성을 정밀하게 진단하여 입지적

특성을 반영한 풍화특성을 고찰하였다. 이 결과는 향후 마애화령석지장의 효율적 보존관리를 위한 정량적 기초자료로 제공될 것이며, 환경 변화에 의한 훼손에 대응하기 위한 실질적 연구 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 보존현황

마애화령석지장은 섬과 육지를 잇는 무코우타노우라(向田野浦)항의 입구에 위치하며, 해안가에 바로 인접하여 쌓아 올린 낮은 석축 위에 조성되었다(Figure 1A). 이로 인해 조수의 변화에 따라 간조 시에는 대기에 완전히 노출되었다가 만조 시에는 암괴의 절반인 마애불의 어깨 높이에서 두상 부분까지 해수에 잠기는 특징적인 환경조건에 놓여 있다(Figure 1B, 1C). 바다를 향해 길게 뻗은 무코우타노우라항의 접안 시설은 파도에 의한 직접적인 충격을 다소 완화시키고 있으나, 파랑작용으로부터 마애불을 보호하기 위한 특별한 보호시설이 없는 실정이다.

이 마애불은 높이 약 2.8m, 폭 약 5m, 두께 약 3.5m의 독립된 암괴에 조성되어 있으며, 중부조(demi-relief; 살 두께가 보통인 부조)의 형식으로 높이 95cm의 지장보살이 조각되었다. 전체적으로 주형광배(舟形 光背)를 만들고 보살의 두부 뒤편에는 부조로 원형의 광배를 표현하였으며 가사는 양 어깨를 모두 덮는 통견으로 가슴 부분에는 영락을 걸치고 있다. 비교적 낮은 대좌 위에 결가부좌하였으며 전형적인 지장과는 달리 양손에 석장과 보주를 들고 있는 모습이다. 지장보살의 좌우에는 화병과 각명(刻銘)이 조각되어 있으나 현재 조수와 파도에 의해 명문의 판독은 어려운 상태이다.

그러나 1986년에 제작된 복제품(현 히로시마현립박물관 소장)에서는 일부를 제외한 대부분의 명문이 확인 가능하다. 지장보살을 중심으로 좌측에는 지장보살본원경(地藏菩薩本願經) 축루인천품(囑累人天品) 제13에 수록된 계(偈)가 조각되어 있고, 다시 그 왼쪽에는 카마쿠라(鎌倉)시

대 후기인 1300년에 타이라 시게모리(平 茂盛)가 대원주가 되어 불사 넌신(佛師念心)에 의해 조성하였다는 내용이 있다. 또한, 지장보살의 우측에는 「東西南北各於一町、□□殺生禁斷」이라는 명문이 남아있다.

최근 마에화령석지장이 암괴 표층의 박락에 의해 조각면이 판독 불가능한 상태로 훼손되었다는 것이 발견되어, 미하라는는 독립행정법인 국립동경문화재연구소의 지도에 따라 보존처리를 실시하였다¹². 처리 작업에 앞서, 1986년에 제작되어 현재 히로시마현립 박물관에서 소장중인 복제품과 표면 상태를 비교한 결과, 전체적으로 녹조류, 파개비와 같은 해양 생물의 착생과 오염, 표면의 마모와 박리박락 등 풍화 상태의 변화를 확인하였다. 보존처리(2011년 11월~2012년 3월)는 암괴 표면 중 박리로 인해 박락될 위험이 있는 지장상 부분을 중심으로 실시되었다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 마에화령석지장을 구성하는 암석의 재질특성과 해수 침수에 따른 풍화양상을 정밀 조사하였으며, 염의 기원과 이동 및 작용 등 염풍화로 인한 암석의 풍화특성을 규명하였다. 현장 조사는 썰물에 의해 해수면이 최저일 때부터 밀물이 들어올 때까지 제한된 시간 내에 실시하였다. 구성암석의 재질특성을 살펴보기 위해 육안관찰을 통한 암석의 기재적 조사와 전압대자율을 측정하였다. 대자율 측정기는 ZH Instruments사의 SM30 모델이며 단위

는 10^{-3} SI unit으로 표기하였다.

또한 마에불이 조각된 암괴의 후면에서 박락된 미세 암석편을 수습하고 구성암석의 광물조성 및 조직, 풍화에 의한 변질광물 생성을 관찰하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 편광현미경은 Carl Zeiss사의 Axiotech 100HD/Progress 3012 편광/반사 겸용 현미경이다. 조암광물의 정밀한 동정을 위해 일부 시료는 X-선 회절분석을 실시하였으며 분석기기는 PANanalytical사의 Empyrean X-선 회절분석기를 이용하였다. 사용된 X-선은 40mA, 45kV이며 $5^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 0.039°/200sec의 조건으로 분석하였다.

마에화령석지장의 표면 손상은 크게 물리적 풍화와 표면오염 및 변질로 구분하여 풍화 및 훼손상태를 진단하였다. 풍화에 따른 암석 표면 상태를 정량적으로 평가하기 위해 표면거칠기 측정기(Profile Gauge)를 이용하여 측정하고 JRC(Joint Roughness Coefficient) 표기법에 준하여 비교하였다. 특히 표면변질이 심각한 부분을 중심으로 디지털휴대용현미경(SCALAR, DG-3X)을 통해 암석표면의 변질상태를 정밀하게 관찰하였으며 오염물의 성분과 원인물질을 분석하기 위해 X-선 형광분석을 실시하였다.

분석을 위해 Innov-X System사의 휴대용 X-선형광분석기(P-XRF) α-6000을 사용하였으며 토양 및 경량원소 모드로 각각 45초씩 원자번호 15번 이상의 원소에 대해서 실시하였다. 또한 표면이 변질된 상태로 박락된 암석 시편을 수습하여 암석 표면 오염물의 고착상태와 오염원을 규명하기 위해 주사전자현미경(SEM)분석을 실시하였다. 현미경은

Figure 1. Field occurrence and surrounding environment of Magai Wareishi jizo. (A) The rock block is adjacent to the sea and situated on the row rock masonry. (B) Appearance at low tide. (C) Appearance at high tide.

Oxford사의 에너지분산형분광계(EDS, Oxford 7324)가 장착된 JEOL사의 JSM 5910LV를 이용하였으며 시료는 금으로 코팅하여 분석하였다.

마애불의 표면 풍화 및 훼손상태에 대한 공간적 분포 양상과 훼손율을 정량적으로 평가하기 위해 실측도면을 바탕으로 현장에서 훼손양상을 도식하고, 2D 그래픽 전문 응용 프로그램(Adobe Illustrator, Auto Cad)을 이용하여 훼손지도 디지털화 및 훼손요인별 점유율을 산출하였다. 표면 손상도에 따른 암석의 물성변화를 비파괴적인 방법으로 정량화하기 위해 초음파 탐사를 실시하였다. 측정기기는 CNS Farnell사의 Pundit-plus이며 측정된 초음파 속도는 전용 프로그램(Surfer)을 이용하여 도면작업을 하였다.

3. 구성암석의 재질특성

마애화령석지장이 위치한 사기섬 일대에는 백악기말 관입된 조립질 흑운모화강암이 넓게 분포한다. 이 마애불은 주변 일대의 지질환경을 반영하는 것으로, 흑운모화강암으로 이루어졌다. 구성암석은 암회색을 띠고 중립 내지 조립의

입자 크기를 갖고며 부분적으로 장석 반정이 관찰된다. 또한 암괴 전체를 둘러싸며 페그마타이트 세맥이 발달해 있고 부분적으로 유색광물의 집합체가 선상배열을 나타낸다.

마애화령석지장과 주변 석조물 및 인근 암반을 대상으로 암석의 재질을 특징지어 동질성을 파악하는 암석학 연구의 수단인 대자율 측정을 실시하였다. 이 결과, 마애화령석지장의 대자율은 $0.04 \sim 0.12 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 분포를 보이며, 평균 $0.08 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 나타났다. 인근 암반은 $0.02 \sim 0.05 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 분포 경향을 보이며 평균 $0.03 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 으로 유사한 분포도를 나타냈다. 반면 주변 석조물인 석등에서는 $1.19 \sim 3.06 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 분포를 보이고 평균이 $2.09 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 상이한 분포도를 보였다(Figure 2).

이들을 대자율값의 차이와 암석기재적 특징에 따라 분류하면, 마애화령석지장과 인근 암반은 흑운모화강암, 주변 석조물인 석등의 일부 부재는 홍장석화강암으로 확인된다. 이는 측정된 대자율 값으로 미루어 볼 때 마애불의 구성암석과 인근 암반은 티탄철석 계열의 화강암에, 주변 석조물인 석등의 일부 부재는 자철석 계열의 화강암에 속하는 것으로 같은 화강암질암이라도 광물조성 및 산출상태에

Figure 2. Magnetic susceptibilities of the rock bolck(Magai Wareishi Jizo), surrounding rock and stoneworks.

따라 대자울 값의 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

마에화령석지장을 구성하는 암석의 광물학적 및 조직적

특징을 살펴보기 위해 편광현미경 관찰을 실시한 결과, 석영, 정장석, 사장석, 미사장석 및 흑운모 등의 구성광물들

Figure 3. Mineralogical characteristics of the rock block(Magai Wareishi Jizo). (A) Microphotographs showing rock-forming minerals of quartz, orthoclase, plagioclase, microcline, biotite and weathering products. (B) Sericite is observed in Subhedral orthoclase and plagioclase showing albite twin. (C) Biotite is chloritized along the plane of cleavage. (D) X-ray diffraction pattern of the rock. Q; quartz, P; plagioclase, K; K-feldspar, B; biotite, A; amphibole.

Figure 4. Physical weathering state of the rock block(Magai Wareishi Jizo). (A) Crack developed along the whole rock block. (B, C) Exfoliation observed on the rock surface. (D) Thickness of exfoliation.

Table 1. P-XRF analysis result on the surface of rock block(Magai Wareishi Jizo).

No	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1	<LOD	<LOD	<LOD	26,035	17,483	1,658	<LOD	5,559
2	<LOD	<LOD	<LOD	18,795	17,427	<LOD	<LOD	5,434
3	<LOD	<LOD	9,084	24,129	7,404	1,362	83	6,882
4	<LOD	<LOD	<LOD	6,192	17,509	<LOD	<LOD	5,240
5	<LOD	<LOD	14,274	19,413	12,967	1,181	<LOD	7,760
6	<LOD	<LOD	18,613	25,879	12,136	2,596	328	19,946
7	<LOD	13,442	22,494	18,848	15,224	1,922	185	11,301
8	<LOD	27,631	46,400	20,614	7,262	1,287	117	7,869
9	<LOD	19,774	37,155	14,326	6,752	1,120	<LOD	4,307
10	<LOD	21,186	29,515	15,021	16,533	<LOD	<LOD	3,999
11	<LOD	20,579	26,549	13,694	10,680	<LOD	110	6,849
12	<LOD	24,923	39,576	16,670	6,903	1,421	128	10,038
13	<LOD	17,593	13,348	17,690	11,938	<LOD	<LOD	2,796
14	<LOD	23,395	21,683	36,019	9,201	<LOD	146	10,641
15	<LOD	9,944	18,305	60,469	5,679	<LOD	115	3,128

Unit; ppm, LOD; limit of detection

과 풍화산물들이 관찰되었다(Figure 3A). 석영은 대개 파동소광을 보여주며 미세균열이 발달되어 있다. 정상석은 반자형으로 변질로 인해 이차적으로 생성된 견운모가 나타나며 사장석은 알바이트 쌍정이 관찰된다(Figure 3B). 흑운모도 부분적으로 입자의 경계나 벽개면을 따라 녹니석화되어 있다(Figure 3C). 시료의 일부를 분말화하여 X-선 회절분석을 실시한 결과, 석영, 알칼리 장석, 사장석, 흑운모 및 소량의 각섬석이 검출되어 현미경 관찰과 함께 구성암석의 조암광물을 확인할 수 있었다(Figure 3D).

4. 풍화 및 훼손상태 진단

4.1. 물리적 풍화 및 훼손

마애화령석지장 인근의 암반은 해수의 파랑에 의한 침식과 풍화작용에 의해 하부의 침식이 진전된 상태이며, 균열의 발달과 함께 암석의 입상분해로 인해 표면 요철이 확인된다. 표면요철도를 정량화하기 위해 표면 거칠기를 측정하고 Barton and Choubey(1977)에 의해 제시된 JRC(Joint Roughness Coefficient) 표기법에 준하여 평가하였다¹³.

JRC 표기법은 길이가 100mm인 시편의 거칠기에 따라 10 개의 대표적인 단면곡선 군을 제시하고 거친 정도가 커짐에 따라 0~20 까지의 계수를 할당한 것으로, 마애불 인근 암반 표면의 거칠기 JRC는 16~20으로 나타났다.

반면 마애불은 암괴 전체에 미세균열부터 대규모 균열의 발달이 진행되고 있으며, 암석 표면과 거의 평행하게 박리면이 형성되어 판상으로 박락되는 박리작용이 심각한 상태이다(Figure 4A, 4B, 4C). 특히 양파 겹질이 벗겨지듯 풍화되는 박리작용은 만조 시 해수면을 중심으로 대기에 노출되는 상부에 집중되어 있었다. 박리가 발생된 표면의 일부를 도시화한 결과, 약 4~8mm 두께의 암편이 판상으로 박리박락되고 있는 것을 확인하였다(Figure 4D).

이와 같이 박리작용이 활발히 진행되고 있는 암석의 표면 요철도를 측정한 결과, 거칠기 계수 JRC가 4~10으로 인근 암석의 표면 풍화상태와 상이한 것을 알 수 있었다. 또한 암석표면에 발달된 균열과 박리 면을 중심으로, 기존에 수지처리한 부분이 풍화작용을 받아 균열이 발생하거나 일부가 결실되어 이차적인 풍화가 우려되었다.

4.2. 표면 오염 및 변질

마에화령석지장의 암석 표면은 상부에서 하부로 갈수록 표면 오염 및 변질상태가 심각하다. 대기환경에 상시적으

로 노출되는 상부는 마애불을 이루는 암석 본연의 색과 광물구성을 확인할 수 있을 정도로 표면이 변색으로부터 양호한 상태를 보인다. 그러나 해수면을 경계로 한 침수 부분에 가까워질수록 표면이 황색으로 변색되다 점이적으로 흑화되면서 원암의 조직과 색이 심하게 변질되었다. 특히 주기적으로 해수에 침수되는 부분은 표면에 오염물이 침착되어 흑색층을 나타내며, 이와 함께 다양한 농도범위를 나타내는 갈색변색과 생물오염이 중첩된 모습을 보인다.

암석 표면의 변질상태에 따른 오염원을 규명하기 위해 P-XRF 분석을 실시하였다(Table 1). 이 결과, P는 검출한계 미만을 보이며 K와 Ca의 함량은 측정지점마다 편차가 크고 특정한 경향성을 확인할 수 없었다. 반면 S와 Cl은 만조 시 해수면을 경계로 흑화층이 뚜렷한 부분에서 암석 표면이 신선한 지점 보다 비교적 높은 농도와 밀집도를 보였다. 또한 Ti, Mn, Fe와 같은 금속원소들도 흑화현상을 보이는 부분에서 원소의 함량이 부화되는 모습을 보였으며, 특히 Fe의 함량이 높은 수치를 나타냈다. 따라서 S, Cl, Ti, Mn, Fe이 흑색 오염물을 이루는 구성성분임을 확인하였다(Figure 5).

표면이 흑화된 미세 암편의 오염물 고착상태와 오염원을 규명하기 위해 주사전자현미경분석을 실시하였다. 이 결과, 암석 표면은 구성 광물의 결정조직이 뚜렷이 확인되지 않을 정도로 오염물이 침착된 상태였으며 곳곳에서 암

Figure 5. Elemental concentration change of contaminants by state of the rock surface alteration.

석의 풍화산물인 점토광물과 다양한 미생물이 혼재되어 있었다(Figure 6A, 6B). 흑색 오염물은 암석 표면에 약 20 μ m 두께 이상의 층위를 보이며 침착된 것으로 치밀한 조직 상태를 나타냈다(Figure 6C).

흑색 오염물 층을 분석한 결과 Mg, S, Cl, Ca, Ti, Fe에서 비교적 높은 함량을 보였다(Figure 6D). 이는 표면 흑화층을 P-XRF로 분석한 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로, 특히 S와 Cl의 경우 해수에 침수되는 부분에 흑화층이 집중되는 점과 더불어 살펴볼 때 해수 중에 녹아 있는 염화나트륨(NaCl), 염화마그네슘(MgCl₂), 황산마그네슘(MgSO₄), 황산칼슘(CaSO₄)과 같은 여러 무기 염류에 기인한 결과로 판단된다. Mg, Fe의 경우 흑운모와 같은 유색광물의 주요 구성성분으로, 침수 부분에서 수분이 지속적으로 유지되는 점을 감안할 때 광물의 산화작용에 의한 수산화물이 표면에 침전되어 검출된 것으로 해석된다.

한편 Al, K는 풍화에 취약한 장석류의 주요 구성성분으로 점토광물과 같은 암석의 풍화산물을 반영하는 결과이

며, 흑색 오염물 층에 비교적 탄소함량이 높은 것은 다량의 유기물이 공존하는 것을 지시하는 것으로 판단된다. 이를 통해 마애화령석지장을 구성하는 표면 흑색 오염물층은 해수 침수에 따른 다양한 무기염류의 공급과 수분에 의한 염 풍화 작용, 광물의 산화작용, 생물의 서식 등 다양한 요인들이 복합되어 형성된 것으로 판단된다.

4.3. 종합 훼손도 평가

마애화령석지장의 표면 풍화 및 훼손상태에 대한 공간적 분포양상을 파악하기 위해 훼손지도를 작성하였다(Figure 7). 훼손지도는 지장보살이 조각된 암괴 정면을 중심으로 작성하였으며 크게 물리적 풍화와 표면오염 및 변질상태로 구분하여 훼손양상을 유형화하였다. 물리적 풍화 및 훼손은 균열, 박리박락, 보수물질 충전으로 대상화하였다. 또한 암석에 발달되어 있는 페그마타이트 세맥도 암석학적 특징이지만 구조적 결함으로 작용할 수 있으므로 기재하였다.

No.	Element(Weight %)												Total (%)
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	
C1	31.30	35.54	3.75	0.97	3.63	11.04	1.57	5.97	1.02	2.69	0.39	2.14	100
C2	33.48	24.72	8.86	1.43	3.01	8.79	1.72	12.32	1.96	1.37	0.30	2.03	100
R1	24.48	16.91	0.48	-	7.39	30.24	0.33	-	20.18	-	-	-	100
R2	7.63	21.32	0.56	-	9.32	36.51	-	-	23.26	-	-	1.4	100

Figure 6. Scanning electron microscopic images and SEM-EDS result of the black contaminants. (A) Black contaminants is tightly adhered on the rock surface. (B) Scanning electron microphotographs showing clay mineral and microorganism. (C) Cross sectional state. (D) SEM-EDS analysis result of black contaminants.

표면오염 및 변질에 의한 훼손은 황색, 갈색, 흑색, 녹색 변색으로 유형화하여 도면에 도시하였다. 이를 바탕으로 종합훼손지도를 작성하였으며 암괴 전체 평면 면적대비 훼손 요인별 면적 점유율을 산출하여 표면 훼손율을 분석하였다. 그러나 훼손양상 중 세맥과 균열은 면적으로 계산하

기 어려워 독립적으로 발생한 총 개수와 길이를 합산하여 정량화하였다(Table 2).

종합 훼손지도를 작성한 결과 암괴 전체를 둘러싸며 페그마타이트 세맥이 사선으로 발달되어 있고 대규모 균열이 수평적 분포 또는 수직적 분포양상을 나타냈다. 특히 암석

Table 2. Comprehensive deterioration rate by weathering form of the Magai Wareishi Jizo.

Ve; Pegmatite vein, Cr; Crack, Ex; Exfoliation, Rm; Repair material, YD; Yellow discoloration, BrD; Brown discoloration, BD; Black discoloration, GD; Green discoloration.

Figure 7. Comprehensive deterioration map of the rock surface(Magai Wareishi Jizo).

의 표면에는 암편이 판상으로 들뜨거나 떨어져 나오는 박리박락이 심각한 상태로, 만조 시 해수의 주요 경계면을 중심으로 대기에 상시 노출되는 상부에 집중되어 있다. 또한 만조 시 해수의 주요 경계면을 중심으로 주기적으로 침수되는 하부는 황변을 나타내다 점이적으로 흑화된 상태로, 갈색 및 흑색으로 표면 변질이 가중될 뿐만 아니라 곳곳에 녹조류 및 따개비 등과 같은 해양생물에 의해 표면 오염이 중첩되었다.

물리적 풍화 양상을 정량적으로 평가하면 마애불 표면에 세맥이 2개, 총 길이 3.8m를 나타냈고 균열은 5개, 총 길이 6.9m로 암괴 전체의 크기와 비교해 볼 때 구조적으로 규모 있는 결함을 나타냈다. 또한 박리박락(14.6%), 보수재료의 충전(0.5%) 순으로 높은 점유율을 보였다. 표면 오염 및 변질에서는 흑색 변색(29.2%), 황색 변색(14.1%), 갈색 변색(4.4%), 녹색 변색(2.9%)의 순으로 높은 점유율을 보였다. 이는 전체 면적의 50.5%를 차지하는 것으로 표면손상 요인 중 표면변질이 가장 높은 비중을 차지하고 있는 것을 지시한다.

표면 풍화 및 훼손상태에 따른 암석의 물성 변화를 파악하기 위해서 초음파 속도를 측정하였다. 측정은 20cm 간격으로 54kHz의 주파수를 가진 원뿔형 탐촉자를 이용하였으며, 현장에서 측정한 직접법 속도와 간접법 속도의 비를 고려하여 보정하였다. 초음파 속도는 해수가 완전히 빠진 후 3시간 경과 후에 실시하였으나 측정 당시 암반 하부의 내부에 수분이 잔존해 있을 가능성이 높다. 일반적으로 초음파 속도는 동일한 암석일지라도 물이 포화된 암석이 건조

된 암석보다 빠른 경향을 보이므로 초음파 속도 결과를 해석하는데 어려움이 있다. 그러나 암석이 외부로부터 동일한 풍화작용을 받았을 경우, 초음파 속도가 균질하게 낮아진다는 점을 고려하고 표면 상태를 감안하여 해석하였다.

지장보살이 조각되어 있는 영역을 중심으로 총 79점에 대해 초음파 속도를 측정된 결과, 2,796~4,437m/s의 속도 범위를 보이고 평균 3,582m/s(표준편차 501)를 기록하였다. 측정된 초음파 속도를 지장보살이 조각된 부분을 중심으로 2D 모델링 한 결과, 훼손지도를 통해 확인된 균열과 박리박락부를 중심으로 저속도대를 보여 표면 물성이 상대적으로 약화된 모습을 알 수 있었다. 또한 표면 훼손상태와 함께 해수에 의해 주기적으로 침수되는 부분의 표면 물성 변화를 파악하기 위해 상부에서 20cm 간격으로 7등분하여 초음파속도를 산출하였다(Figure 8).

높이에 따른 초음파속도를 살펴본 결과, 내부에 균열이 형성되어 있는 최상부의 평균 초음파속도는 3,077m/s로 산출되었으며, 2열은 3,887m/s, 3열은 3,316m/s, 4열은 3,331m/s, 5열은 3,787m/s, 6열은 3,813m/s, 7열은 3,717m/s로 나타났다. 높이별 초음파 속도의 편차를 살펴 본 결과, 암괴의 하부보다 상부에서 높은 편차 값을 보이는 것으로, 만조 시 해수면을 경계로 상부에서 많은 물성 변화가 있었다는 것을 알 수 있다. 또한 균열과 같은 구조적 결함이 발생하지 않는 2열에서 7열까지의 초음파속도의 변화를 살펴 본 결과, 만조 시 해수의 경계면(3열, 4열)을 중심으로 낮은 초음파 속도대가 확인되어 다른 부분에 비해 물성이 취약한 것을 확인하였다.

Figure 8. 2D modeling contour map of ultrasonic velocity for the carved side of Magai Wareishi Jizo.

Table 3. Crystallization pressures of some salt(Winkler, 1994)¹⁵.

Salt	Chemical formula	D (g/cm ³)	Mw (g/mol)	Mv (cm ³ /mol)	Crystallization pressure(atm)			
					C/C _s =2		C/C _s =10	
					0℃	50℃	0℃	50℃
Anhydrite	CaSO ₄	2.96	136	46	335	398	1120	1325
Bischofite	MgCl ₂ ·6H ₂ O	1.57	203	129	119	142	397	470
Dodecahydrate	MgSO ₄ ·12H ₂ O	1.45	336	232	67	80	222	264
Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.68	246	147	105	125	350	415
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.32	127	55	282	334	938	1110
Halite	NaCl	2.17	59	28	554	654	1845	2190
(Heptahydrate)	Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	1.51	232	154	100	119	334	365
Hexahydrate	MgSO ₄ ·6H ₂ O	1.75	228	130	118	141	395	469
Kieserite	MgSO ₄ ·H ₂ O	2.45	138	57	272	324	910	1079
Mirabilite	MgSO ₄ ·10H ₂ O	1.46	322	220	72	83	234	277
Natron	MgCO ₃ ·10H ₂ O	1.44	286	199	78	92	259	308
Tachhydrite	2MgCl ₂ ·CaCl ₂ ·12H ₂ O	1.66	514	310	50	59	166	198
Thenardite	Na ₂ SO ₄	2.68	142	53	292	345	970	1150
Thermonatrite	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O	2.25	124	55	280	333	935	1109

D : Density, Mw : Molecular weight, Mv : Molar volume

5. 풍화특성 고찰

마에화령석지장은 해안가에 인접해 있으며 해수에 의해 암괴의 일정부분이 주기적으로 침수되어 구성암석에 지속적으로 염이 공급된다. 염은 수분과 함께 암석의 풍화에 있어 가장 유해한 요소로 작용하는 것으로, 결정화에 따른 부피팽창, 수화에 따른 부피팽창, 암석과의 열팽창률의 차이, 삼투압 등의 과정으로 암석에 영향을 미친다^{14,15}. 염풍화는 주기적으로 염류가 공급되면서 결정작용이 이루어 질 수 있도록 온도와 습도 변화가 있어야 하는 특수한 환경에서 나타나는 것으로, 염과 암석의 종류에 따라 풍화상태와 정도를 달리 한다^{16,17}.

마에불 표면에서 탈락된 미세 암편을 주사전자현미경으로 영상 분석한 결과, 암석의 미세 균열 및 공극을 따라

NaCl의 염이 결정화된 것을 확인 할 수 있었다(Figure 9). NaCl은 암석에 영향을 미치는 다양한 염 중 결정화 압력이 가장 큰 크며, 암석보다 열팽창률이 커 가열과 냉각이 반복됨에 따라 기계적 풍화를 촉진시킬 뿐만 아니라 화학적 풍화까지 수반한다고 보고되고 있다(Table 3)^{15,18}.

이 마에불은 침수에 의한 직접적인 공급과 물보라, 주변 기류 등에 의한 간접적인 공급에 의해 암석 내에 염이 침투한다. 이 같은 염은 수분과 함께 용액 상태로 암석 내 미세 균열 및 공극 내를 이동하다 수분이 증발되어 결정화 작용을 한다. 특히 염 결정화 작용에 따른 표면층 박리박락 영역은 대기에 노출되는 상부에 집중되는데, 이는 기온, 습도, 일사, 기류 등과 같은 복잡한 대기환경 변화가 건조와 젖음에 영향을 미치고 결과적으로 염 석출을 결정하여 염 손상에 있어 중요한 역할을 담당하고 있기 때문이다. 또한 이

Figure 9. Crystallization state of salt on the rock surface. (A) Crystallization occurrence of salt. (B) SEM microphotograph and EDS pattern of salt.

같은 대기환경 변화에 노출되어 있는 암석은 표면층에서 수축과 팽창을 반복하므로 내부 보다 미세균열 및 공극과 같은 결함이 집중되어 표면 손상을 가중시킬 것으로 예측된다. 이 같은 박리작용은 물성을 약화시키고 표면층을 떨어져 나가게 하여 명문 및 조각 면의 소실을 진전시킬 것이다.

반면 해수에 의해 주기적으로 침수되는 부분은 오염물이 침착되어 흑화층을 나타내며 이와 함께 갈색변색과 생물오염이 중첩된 상태이다. 흑색 오염물의 고착상태와 오염원을 분석한 결과, 해수의 무기 염류에 기인한 염화염과 황산염이 공급된 것으로 보이며, 유색광물로부터 용해된 금속원소 성분이 산화되어 표면에 수화물 상태로 침전된 상태임을 알 수 있었다. 또한 암석의 풍화산물인 점토광물과 해양생물 등이 혼재된 상태로, 표면에 얇고 치밀한 층위를 보이며 고착되어 표면의 흑화현상을 가중시키는 것으로 판단하였다.

이는 암석 표면의 흑화층이 주로 해수에 의해 침수되는 부분에 집중되는 것으로 볼 때, 수분과 해수 염류의 지속적인 공급에 따른 암석의 다양한 화학적 풍화산물 및 해양 미생물의 서식 등이 복합적으로 작용하여 형성된 것으로 판단된다. 특히 오염물 내에서 검출되는 주요 염(NaCl)은 대기로부터 수분을 끌어당기는 강한 흡습성 염으로, 암석 표면의 습윤 상태를 지속적으로 유지하게 하여 화학적 풍화 및 생물서식을 촉진시킬 수 있다. 또한 암석 표면에 흑색 오염층이 침착된 상태는 마에불 본연의 미적가치를 훼손시킬 뿐만 아니라 원암의 색과 조직 확인이 어려워 표면 풍화 및 훼손도를 판단하는데 어려움이 있다.

6. 결 론

1. 마에화령석지장은 해안가에 인접할 뿐만 아니라 해수에 의해 주기적으로 일정 부분이 침수되는 특수한 입지적 조건에 있다. 마에불을 이루는 암석은 주변 일대의 지질환경을 반영하는 것으로, 흑운모화강암으로 이루어졌다. 이 암석은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모를 조암광물로 중립 내지 조립의 입자 크기를 갖고며 내구성이 강한 편이나, 암석 내 페그마타이트 세맥, 균열과 같은 구조적 결함을 보이고 수분과 염의 공급으로 구성암석의 색과 강도 및 내구성 등 물성이 변화된 상태이다.

2. 특히 마에불을 이루는 암석의 표면에는 암편이 판상으로 들뜨거나 떨어져 나오는 박리박락이 심각한 상태이다. 마에불의 전체 면적 대비 14.6%의 점유율을 보이는 박

리박락 양상은 만조 시 해수의 주요 경계면을 중심으로 대기에 상시 노출되는 상부에 집중되어 있다. 이는 기온, 습도, 일사, 기류 등과 같은 대기환경 변화에 의해 암석 표면층이 수축과 팽창을 반복하면서 내부보다 미세균열 및 공극과 같은 결함이 집중된 것에 기인한 결과로, 암석 내부에 침투한 NaCl 염용액과 주변 환경과의 복잡한 상호작용에 의한 것으로 판단된다.

3. 반면, 해수의 주요 경계면을 중심으로 주기적으로 침수되는 하부는 오염물이 침착되어 흑화층을 나타내며 이와 함께 갈색변색과 생물오염이 중첩된 상태이다. 암석 표면의 오염 및 변질 양상은 흑색(29.2%), 황색(14.1%), 갈색(4.4%), 녹색(2.9%) 순으로 높은 점유율을 보이며 총 면적 대비 50.5%를 나타냈다. 특히 암석 표면의 흑화현상은 수분과 해수 염류의 지속적인 공급에 따른 암석의 다양한 화학적 풍화산물 및 해양 미생물의 서식으로 형성된 것으로, 암석 표면의 습윤 상태를 지속적으로 유지하게 하여 화학적 및 생물학적 풍화를 촉진시킬 것으로 사료된다.

4. 암석 표면의 풍화 및 훼손상태에 따른 물성변화를 살펴본 결과, 훼손지도를 통해 확인된 균열과 박리박락부를 중심으로 저속도대를 보여 표면 물성이 상대적으로 약화된 모습을 알 수 있었다. 또한 주요 해수면을 경계로, 암괴의 상부가 하부에 비해 저속도 분포를 보이고 속도 편차가 큰 편으로 많은 물성 변화를 경험한 것을 알 수 있다. 특히 해수의 경계지점의 경우 낮은 초음파 속도대가 확인되어 다른 부분에 비해 물성이 취약한 것을 확인하였다.

5. 마에화령석지장은 특수한 입지적 환경조건하에 위치하기 때문에 인위적인 환경 제어와 관리가 어렵다. 이는 보존처리가 실시되어도 이 같은 환경을 벗어나지 않는 한 훼손은 계속적으로 진행될 것이다. 따라서 앞으로 예측할 수 없는 환경에 대비하고 문화재로서 최대한의 내구수명을 확보하기 위해서는 현 상태에 기준한 정량적인 풍화훼손진단 자료를 바탕으로 주기적이고 정확한 상태 모니터링과 신속한 조치가 필요할 것으로 판단된다. 특히 염풍화의 경우 국지기후에 의존하며 기후 변동물에 민감하므로 환경 모니터링을 통한 염 손상 예측도 고려하여야 할 것이다.

사 사

이 연구는 한일 문화재 보존환경 공동연구의 일환으로 수행된 것이며, 현장 조사가 원활히 이뤄질 수 있도록 배려해 주신 동경문화재연구소 측에 깊이 감사한다.

참고문헌

1. Lee, C.H., Chung, Y.S., Kim, J. and Lee, J.E., "Behavior interpretation and secondary degradation of the standing sculptured Buddha at the Yongamsa Temple, Ogcheon, Korea". *Journal of Conservation Science*, **17**, p83-94, (2005).
2. Lee, C.H., Lee, M.S. and Suh, M., "Safety interpretations of the discontinuity and weathering characteristics of the Gaheungri Triple Buddha, Yeongju, Korea". *Journal of the Geological Society of Korea*, **41**, p401-413, (2005).
3. Lee, C.H., Jo, Y.H. and Kim, J., "Damage evaluation and conservation treatment of the tenth century Korean rock-carved Buddha statue". *Environmental Earth Science*, **64**, p1-14, (2011).
4. Jo, J.H., Jo, Y.H., Chun, Y.G., Choi, J.H. and Lee, C.H., "Precisely nondestructive diagnosis and slope stability of the Bonghwa Bukjiri Maeyeoraejwasang(rock-carved seated Buddha statue), Korea". *Journal of Conservation Science*, **26**, p121-132, (2010).
5. Lee, S.M., Lee, C.H. and Kim, J., "Detailed deterioration evaluation and analysis of conservation environment for the Seosanmaaesamjonbulsang(rock-carved triad Buddha in Seosan), Korea". *Journal of Conservation Science*, **26**, p277-294, (2010).
6. Lee, S.M., Jun, B.K., Shin, E.J. and Lee, C.H., "Detailed deterioration diagnosis and analysis of site environment for the Taean Dongmunri Maesamjonbulipsang (rock-carved standing triad Buddha statue), Korea". *Journal of Conservation Science*, **27**, p381-393, (2011).
7. Jo, J.H., Lee, C.H., Kim, J. and Morii, M., "Deterioration evaluation and material characteristics of the Usuki Stone Buddha Statues in Oita, Japan". *Journal of Conservation Science*, **28**, p39-52, (2012).
8. Kim, S.S. and Park, H.D., "Effect of salt crystallization on stone durability". *Economic and Environmental Geology*, **32**, p203-208, (1999).
9. Min, K.W., Chin, H.I. and Park, J.D., "Deterioration of stone materials by salt weathering". *Journal of Advanced Mineral Aggregate Composites*, **8**, p3-8, (2003).
10. Lee, C.H., Chun, Y.G., Jo, Y.H. and Suh, M., "Evaluation of slope stability and deterioration degree for Bangudae Petroglyphs in Ulsan, Korea". *Journal of Conservation Science*, **28**, p153-164, (2012).
11. Yoo, J.H., Lee, C.H. and Eo, E.I., "Evaluation of deterioration diagnosis and conservation environments of the large and the giant dinosaur footprint fossils in Haenam Uhangri, Korea". *Journal of the Geological Society of Korea*, **48**, p325-340, (2012).
12. Mihara, "Conservation report of Wareishi-jizou statue carved on rock surface in Hiroshima". p30, (2012).
13. Barton, N. and Choubey, V., "The Shear strength of rock joints in theory and practice". *Rock Mechanics*, **10**, p1-54, (1977).
14. Goudie, A. and Viles, H., "Salt weathering Hazards". John Wiley & Sons, Chichester, (1997).
15. Winkler, E.M., "Stone in architecture", 3rd ed., *Springer-Verlag*, New York, p166, 315, (1994).
16. Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Menéndez, B., Benavente, D., Harris, I., Déqué, M., "Climatology of salt transitions and implications for stone weathering". *Science of the Total Environment*, **409**, p2577-2585, (2011).
17. Benavente, D., Sanchez-Moral, S., Fernandez-Cortes, A., Cañaveras, J.C., Elez, J. and Saiz-Jimenez, "Salt damage and microclimate in the Postumus Tomb, Roman Necropolis of Carmona, Spain". *Environmental Earth Sciences*, **63**, p1529-1543, (2011).
18. Cooke, C.W. and Smalley, I.J., "Salt weathering in deserts". *Nature*, **220**, p1226-1227, (1968).