남원 신계리 마애여래좌상의 손상도 평가 및 보존처리

전유근 | 이명성¹ | 이재만 | 이재진*
국립문화재연구소 보존과학연구실, *한림보존테크

Conservation Treatment and Deterioration Evaluation of the Namwon Singyeri Maaeyoraejwasang (Rock-Carved Seated Buddha Statue), Korea

Yu Gun Chun | Myeong Seong Lee¹ | Jae Man Lee | Jae Jin Lee*
Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea
*Hanrim Conservation Tech., Co. Ltd., Jeonju, 560-870, Korea

¹Corresponding Author: mslee75@korea.kr, +82-42-860-9267

초록 남원 신계리 마애여래좌상은 엽리상화강암으로 구성되어 있으며 상부와 하부의 변성도 및 풍화도가 다른 것으로 확인되었다. 손상도 평가 결과, 상대적으로 변성을 많이 받은 불상의 상부는 하부에 비해 물성이 낮은 것으로 평가되었으며 손상요인 중 생물에 의한 훼손이 가장 심각한 것으로 분석되었다. 생물종에 따른 생물량(*Chl. a*)을 계산한 결과, 선타류는 $2.3\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 엽상지의류는 $1.1\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 고착지의류는 $0.2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 측정되어 생물량이 높은 순서대로 보존처리를 실시한다면 효과적일 것으로 분석되었다. 이상과 같은 손상도 평가 결과를 토대로 예비세정, 건식세정, 습식세정 순으로 보존처리를 실시하였다. 신계리 마애여래좌상의 장기적인 보존을 위해서는 향후 보존처리시 강화처리와 함께 주변환경 정비를 실시해야 할 것이다.

중심어: 마애여래좌상, 엽리상화강암, 생물훼손, 보존처리

ABSTRACT Namwon Singyeri Maaeyoraejwasang (Rock-Carved Seated Buddha Statue) is composed mainly foliated granite and is different metamorphic grade and weathering degree on rock location. As the results of deterioration evaluation, upper part of the buddha statue was estimated that granularity decomposition was serious and rock strength was lower than lower part. Furthermore organism assessed most effect of among weathering factors. *Chl. a* amount of organism species were calculated $0.2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ of crustaceous lichen, $1.1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ of foliose lichen, $2.3\mu\text{g}/\text{cm}^2$ of bryophyte. Organism was taken treatment in order of amount of *Chl. a* and pre-cleaning, dry cleaning, wet cleaning in sequence. It should be establish conservation plan that strengthening in consideration of lithology characteristics and setting in good condition environment to conserve long-term of Maaeyoraejwasang.

Key Words: Maaeyoraejwasang, Foliated granite, Biodeterioration, Conservation treatment

1. 서론

마애불은 바위면에 새겨 놓은 불상으로 선각이나 부조로 조성하여 불교의 주제나 내용을 형상화한 것이다. 이러한 마애불은 지반과 한몸을 이룬 암벽에 조각해 놓았기 때문에 조성한 당대 사람들의 심성과 미의식은 물론, 부처를 새기기 위해 선택한 바위의 지형적 특성을 생생히 파악하게 해준다. 따라서 마애불은 자연에 거스름 없이 신앙과 예술을 조화시켜 낸 한국의 대표적인 문화유산이라 할 수 있다(Lee and Lee, 2001).

그러나 우리나라 마애불은 대부분 아무런 보호시설 없이 오랜 기간 동안 노출되어 물리적, 화학적, 생물학적 요인 등 다양한 풍화작용을 받아왔다. 이러한 풍화작용은 구성암석의 암석학적 특성에 따라 훼손양상을 달리하며 동질의 암석이어도 마애불이 위치한 자연환경에 따라 풍화특성이 달라진다(Lee *et al.*, 2012). 고려시대에 만들어진 남원 신계리 마애여래좌상(보물 제423호)도 제작당시부터 현재까지 약 1,000년 동안의 지속적인 풍화작용으로 인해 물리적, 화학적 및 생물학적 훼손이 심각한 상태이다.

남원 신계리 마애여래좌상의 장기적인 보존관리를 위해서는 구성암석의 재질특성을 바탕으로 정량적인 손상도를 파악하고 이를 토대로 보존대책을 수립해야 한다. 최근 마애불의 훼손상태를 정량적으로 평가하기 위한 많은 연구들이 보고되고 있으며 기술력 또한 상당한 진전을 보이고 있다(Lee *et al.*, 2005a; 2005b; 2010; 2011a; 2011b; 2012; Jo *et al.*, 2010; 2012). 그러나 대부분의 연구는 훼손도 평가 기법 및 결과에 대한 내용이 대부분으로 보존처리 내용과 함께 보고된 사례는 상대적으로 적은 실정이다(Lee *et al.*, 2003).

따라서 이 연구에서는 남원 신계리 마애여래좌상의 체계적인 보존관리를 위해 구성암반의 재질특성을 규명하고 손상도를 정량적으로 분석하였다. 또한 손상도 평가결과를 반영한 보존처리를 실시하고 연구진행 과정을 기록화하여 장기적인 보존관리 방안을 수립하였다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 현황

남원 신계리 마애여래좌상은 자연암반에 입체적으로 조각되어 있는 마애불로 역사적, 미술사적으로 매우 중요한 문화재로 평가되고 있다. 특히 구슬처럼 둥글게 표현한 광배에는 연꽃잎을 표현하였는데 이러한 구슬 모양의 머리광배는 그 예가 별로 없는 특이한 것으로 주목받는다. 양감이 풍부한 얼굴 표현 등은 통일신라 후기의 특징이지만, 풍만한 신체에 비하여 각 부분의 세부표현이 간략화된 점 등을 고려할 때, 고려시대에 만들어진 불상으로 여겨진다(Cultural Heritage Administration in Korea, 2013).

이 마애여래좌상은 남원시 풍악산 중턱에 입지하고 있으며 특별한 보호시설 없이 자연암반 위에 위치하고 있다(Figure 1A, 1B). 마애여래좌상은 전면의 폭이 3.3m, 높이는 4.7m로 하나의 암체에 조각되어 있다. 이 암체는 불상과 수평한 방향으로 발달한 절리에 의해 3개로 분리되어 있으며(Figure 1C), 절리면을 따라 크고 작은 균열들이 발생되어 구조적인 보강을 위한 보존처리가 실시된바 있다. 불상 주변에 서식하고 있는 수목으로 인해 불상은 대부분 그늘에 가려져 있는 상태로 생물에 의한 피해 가능성이 높은 환경에 있다.

Figure 1. Location and general views of the Singyeri Maaeyeoraejwasang. (A) Location map, (B) Front view, (C) Side view.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 남원 신계리 마애여래좌상 구성암석의 재질특성을 분석하고 손상도를 평가하였다. 손상도 평가는 손상지도를 작성하여 훼손유형을 분류하고, 다양한 분석기법을 활용하여 물리적, 화학적, 생물학적 손상도를 정량적으로 분석하였다. 연구대상이 문화재인 점을 감안하여 모든 분석방법은 비파괴 기법으로 수행하였다. 또한 분석 및 진단결과를 토대로 보존관리 방안을 수립하고 보존처리를 실시하였다.

마애여래좌상의 재질특성을 규명하기 위해 우선 남원시 일대에 대한 지질자료를 분석하여 구성암석의 조성시기, 암종 등을 파악하였다. 조사 당시 마애불은 전면에 생물이 서식하고 있어 암상을 관찰하기에 많은 제약이 있었으나 디지털휴대용현미경(SCALAR, DG-3X)를 활용하여 암상 및 풍화상태를 정밀관찰 하였다. 또한 암석의 자화강

도를 측정하기 위해 ZH Instruments사의 SM30을 활용하여 전암대자율을 측정하였다.

마애불상의 손상도를 평가하기 위해 손상지도 작성, 초음파속도 측정, P-XRF 분석 및 생물학적 오염도를 측정하였다. 손상지도는 Jo and Lee(2011)가 제시한 방법을 참고하여 현장조사 및 고해상도 사진자료를 바탕으로 작성하였으며 이를 통해 손상유형 분석 및 점유율을 산출하였다. 손상도면 작성에 사용된 프로그램은 2D그래픽 전문응용 프로그램인 Adobe Illustrator CS5이며 훼손율 산출은 AUTO CAD를 이용하였다.

재질특성 및 풍화상태에 따른 물성변화를 파악하기 위해 초음파속도를 측정하였다. 초음파속도는 CNS Farnell사의 Pundit-plus를 사용하였으며 측정결과를 2D 모델링하여 전체적인 물성분포 양상을 파악하였다. 또한 훼손양상에 따른 원소함량의 변화를 살펴보기 위해 Innov-X System의 P-XRF α -6000을 사용하여 정밀분석 하였다. 분

Figure 2. Geological map of study area and lithology characteristics of the Singyeri Maeyeoraejwasang. (A) Geological map (modified after Kim and Lee, 1984), (B) Magnetic susceptibilities of the host rock, (C) Microphotograph showing foliated-biotite and granularity decomposition of top on the buddha statue, (D) Microphotograph showing rock-forming minerals of quartz, orthoclase and biotite of bottom on the buddha statue.

석은 토양모드와 LEAP(light element analysis process)모드로 각각 45초씩 원자번호 15번 이상의 원소에 대해서 수행하였다. 생물학적 오염도를 평가하기 위해 환경요인 분석과 자생하고 있는 생물량을 측정하였으며 이를 통해 보존처리 기준을 수립하였다.

이와 같은 다양한 재질분석 및 손상도 평가 결과를 종합하여 마애여래좌상의 풍화 및 훼손상태를 파악하고 보존 방안을 수립하였다. 보존처리는 2012년 6월에서 9월까지 4개월간 실시하였으며, 이 기간 동안 2차례의 기술지도 회의를 통해 보존처리 방법 및 영역을 구체화 하였다. 또한 보존처리에 발생한 모든 사항들을 기록화 하였다.

3. 암석학적 특징 및 풍화특성

남원 지역의 지질은 남원화강암으로 명명될 정도로 화강암이 광범위하게 분포하고 있다(Kim and Lee, 1984). 남원화강암체는 동쪽의 지리산편마암복합체, 서쪽의 순창화강암체 및 대강화강암체의 세 암체사이에 심장 모양으로 분포하는 저반형 화강암이다(Kim *et al.*, 1964; Hong and Hwang, 1984). 남원화강암체는 크게 각섬석-흑운모 화강섬록암, 반상 각섬석 흑운모 화강섬록암, 흑운모화강암, 복운모화강암으로 구성되며 소규모의 섬록암, 반화강암 등이 분포하고 있다(Hong *et al.*, 1988; 2004).

신계리 마애여래좌상은 트라이아스기 말기의 대강 엽리상 화강암과 남원화강암의 접경지대에 위치하고 있다(Figure 2A). 마애여래좌상이 조각되어 있는 화강암의 전암 대자율은 $0.002\sim0.078(\times 10^{-3} \text{ Si unit})$ 의 범위를 보이며 평균 $0.032(\times 10^{-3} \text{ Si unit})$ 로 측정되었다(Figure 2B). 이와 같이 낮게 측정된 전암대자율 값을 고려할 때, 마애불상은 티탄 철석 계열의 화강암으로 분류된다.

마애불상의 광물학적 조성 및 풍화상태를 파악하기 위해 휴대용현미경 관찰을 실시한 결과, 주구성광물은 중립질의 석영, 사장석, 정장석, 흑운모로 확인되었으며 소량의 백운모도 관찰되었다. 전체적으로 마애불상의 광물함량은 유사하지만 관찰위치에 따라 암상 및 풍화도의 차이를 보였다. 마애불상 상부의 흑운모는 길게 신장되어 엽리상을 보이고 있으며 풍화에 의해 광물입자들이 서로 이격되어 입상분해가 심각한 상태이지만(Figure 2C), 하부의 흑운모는 대부분 방형으로 변성도가 적은 것으로 확인되었으며 광물입자들은 상대적으로 치밀한 조직을 나타냈다(Figure 2D).

이와 같이 신계리 마애여래좌상을 구성하는 화강암은

하나의 암체임에도 불구하고 상부와 하부에서 변성도와 함께 풍화도의 차이를 나타냈다. 마애불상이 조각된 이후 동일한 환경에서 풍화를 받았다는 점을 고려할 때, 상부와 하부의 풍화도 차이는 변성작용을 받은 불상의 상부 영역이 상대적으로 풍화에 민감하게 반응했다는 것을 의미한다.

4. 손상도 정량평가

4.1. 훼손현황

신계리 마애여래좌상의 훼손양상을 파악하기 위해 육안관찰을 실시한 결과, 마애불상은 균열, 박리박락, 입상분해와 같은 물리적 훼손과 지의류, 선태류와 같은 생물학적 훼손이 주요 훼손유형으로 분류되었다. 이에 대한 정량적인 손상정도를 파악하기 위해 손상지도를 작성하였으며, 향후 보존처리 및 모니터링에 이용될 수 있도록 기존의 연구자료(Jo and Lee, 2011)를 응용하였다.

우선 훼손유형 중 물리적인 훼손양상을 살펴보면, 균열은 마애불상 전면에서는 확인되지 않으나 측면에서 구열상으로 발생한 다수의 미세균열과 절리에 의해 형성된 큰 균열들이 분포하는 것으로 확인되었다(Figure 3A). 구조적 불안정을 유발할 수 있는 균열들은 과거에 시멘트 몰탈로 보존처리 되어 있는 상태이다(Figure 3B). 육안으로 확인되지 않지만 타진법을 통해 박리박락 발생유무를 파악한 결과, 마애불상의 측면에서 다수 분포하는 것으로 확인되었다. 또한 입상분해는 전반적으로 마애불상의 상부에 집중적으로 발생되어 있는 것으로 나타났다(Figure 3C).

마애불상은 전면에 걸쳐 생물이 서식하는 것으로 확인되었으며 생물종은 크게 지의류와 선태류로 분류된다. 이 중에서 지의류는 녹색, 황색, 회색, 흑색 등 색상이 다양하며 서식형태도 암석의 표면에 완전히 고착되어 있는 지의류와 엽상지의류 등으로 분류된다. 이와 같이 다양한 종류의 생물들은 종마다 군집되어 있기도 하지만 대부분은 상호 교호하며 복합적으로 발생되어 있다(Figure 3D~3F).

이러한 훼손양상을 보이는 마애여래좌상의 손상지도를 작성하고 손상율을 산출하였다(Figure 3G). 균열은 우측면 44개, 좌측면 11개가 발생한 것으로 산출되었으며, 이를 보수하기 위해 사용된 시멘트 몰탈의 점유율은 우측면 10.5%, 좌측면 7.5%로 나타났다. 박리박락은 좌측면 13.7%, 우측면 13.4%의 점유율을 보였다. 따라서 물리적 손상은 불상이 조각되어 있는 전면이 아닌 측면에만 집중되어 있

는 것으로 분석되었다. 생물은 마애불상 전면에 걸쳐 분포하고 있어 100.0%로 산출하였다(Table 1).

마애여래좌상에서 확인되는 주요 손상요인 중 입상분해는 전술한 바와 같이 구성암석의 상부에 집중적으로 발생되어 있는 것을 확인되었으나 전면에 걸쳐 서식하고 있

는 생물이 암석표면을 피복하고 있어 명확한 영역설정 및 점유율 산출이 불가능하였다. 또한 일반적인 다른 석조문화재와 달리 화학적 풍화작용에 의해 발생하는 변색이 확인되지 않는 것도 이러한 이유 때문이다. 이상의 결과를 종합해보면, 불상이 조각되어 있는 전면은 생물에 의한 손상

Table 1. Deterioration rates by weathering form of the Singyeri Maaeyoraejwasang.

Classification	Crack(ea)	Mortar(%)	Exfoliation(%)	Biodeterioration(%)
Front	0	0.9	0.1	100.0
Right	44	10.5	13.7	100.0
Left	11	7.5	13.4	100.0

Figure 3. Statement of damages and deterioration maps of the Singyeri Maaeyoraejwasang. (A) Microcracks, (B) Mortar, (C) Granular disintegration, (D) Various species of organism, (E) Crustaceous and foliose lichen, (F) Bryophyte, (G) Deterioration maps of the buddha statue.

이 가장 심각한 것으로 확인되었으며 피복되어 있는 생물 안쪽에 입상분해 및 화학적 풍화현상이 잠재되어 있는 것으로 볼 수 있다.

4.2. 초음파 물성측정

풍화에 따른 신계리 마애여래좌상의 물성변화를 살펴 보기 위해 초음파속도를 측정하였다. 초음파속도 측정은 간접전달 방식으로 전면 240지점, 각 측면은 120지점씩 실시하였다. 간접전달 방식으로 초음파속도를 측정할 경우, 초음파가 매질의 표면보다 내부에서 더 빨리 진행되기 때문에 직접전달 방식보다 과소평가 될 수 있다. 따라서 직접 법속도와 간접법속도의 비를 고려하여 속도를 보정해야 한다(Lee *et al.*, 2009). 이를 위해 마애여래좌상 남쪽으로 약 500m 지점에 위치하고 있는 화강암 채석장에서 시료를 채취하고 보정계수를 산출하여 마애불상에 적용하였다.

초음파속도 측정결과, 전면은 848~3,789m/s의 넓은 범위를 형성하고 있으며 평균은 1,667m/s, 표준편차는 502m/s로 나타났다. 우측면의 초음파속도는 388~3,084m/s의 범위

를 형성하고 있으며 평균은 1,627m/s, 표준편차는 624m/s로 산출되었으며, 좌측면은 441~2,500m/s의 범위를 보이며 평균은 1,378m/s, 표준편차는 466m/s로 측정되었다(Table 2). 초음파속도 측정결과를 바탕으로 암석의 풍화정도를 파악하기 위해 풍화도지수(k)를 산출하였다. Iliev(1967)에 의해 제시된 풍화도지수는 신선한 암석과 풍화된 암석의 상대적인 초음파속도비를 계산하는 것으로 0.0~1.0까지 산출되며, 값이 증가할수록 암석이 풍화되었다는 것을 의미한다. 풍화도지수 산출식은 아래와 같다.

$$k = \frac{V_u - V_w}{V_u}$$

(V_u : 신선한 암석의 초음파속도, V_w : 풍화된 암석의 초음파속도)

풍화도지수를 계산하기 위한 신선한 암석의 초음파속도는 채석장에서 채취한 신선한 화강암(평균 초음파속도: 3,200m/s)을 기준으로 하였다. 마애여래좌상의 각 방위별 풍화도지수를 계산한 결과, 전면은 0.48, 우측면은 0.49, 좌측면은 0.57로 산출되었으며, 이는 암석의 풍화등급 중

Table 2. Results of the ultrasonic velocity(m/s) measurement of the Singyeri Maeyeoraejwasang.

Classification	Mean	Maximum	Minimum	Standard deviation
Front	1,667	3,789	848	502
Right	1,627	3,084	388	624
Left	1,378	2,500	441	466

Figure 4. Results showing distributional patterns of ultrasonic velocities on the Singyeri Maeyeoraejwasang.

4등급으로 상당한 풍화등급에 해당하는 것이다. 따라서 마애불상이 풍화작용으로 인해 물성이 상당히 감소한 것으로 판단할 수 있다.

그러나 신계리 마애여래좌상의 초음파속도는 측정위치에 따라 상당한 편차를 나타내고 있다. 이는 한 암체에 조각된 마애불상에서도 풍화가 차별적으로 발생하였다는 것을 의미한다. 초음파속도의 전체적인 분포양상을 파악하기 위해 2D 모델링을 실시한 결과, 마애불상의 상부는 하부보다 상대적으로 낮은 초음파속도를 나타냈다(Figure 4). 이는 풍화작용에 의해 불상 상부의 물성이 상대적으로 빠르게 감소하였다는 것을 의미한다.

일반적으로 초음파속도는 암석의 탄성계수 및 밀도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 같은 암석에서도 공극률 및 미세균열의 발달정도에 따라 다르게 나타난다. 암석학적 특성에서 전술한 바와 같이 마애여래좌상은 하나의 암체에서도 암상의 차이를 보였다. 이와 같은 초음파속도 측정 결과는 흑운모의 엽리상을 보이는 마애불상의 상부가 상대적으로 풍화가 빠르게 진행되었다는 것으로 해석할 수 있다. 또한 초음파속도가 낮은 영역은 생물이 피복되어 육안으로 확실히 구분되지 않았던 입상분해가 발생한 것으로 판단된다.

4.3. P-XRF 분석

화학적 풍화에 의한 마애여래좌상 표면의 성분함량 변화를 살펴보기 위해 비파괴 분석기기인 P-XRF를 활용하여 성분분석을 실시하였다. 분석은 신선한 영역과 각 색상별 생물이 분포하는 영역으로 분류하여 측정하였다. 신선한 영역을 대상으로 분석을 실시한 결과, S(황)과 Cl(염소)은 검출되지 않았으며 각 원소의 평균함량은 K(칼륨)의 경우 30,446ppm, Ca(칼슘)는 5,492ppm, Mn(망간)은 126ppm, Fe(철)는 6,111ppm으로 분석되었다(Table 3).

반면 신선한 영역에서 검출되지 않았던 S와 Cl은 녹색, 회색, 흑색 지의류가 서식하고 있는 일부 영역에서 검출되었다. 이는 생물이 성장하는 과정에서 생물과 암석의 반응에 의해 생성되었거나 외부로부터 유입된 원소들이 생물에 흡착되었기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 이 원소들은 염을 생성하여 암석의 2차 훼손을 유발할 수 있으므로 표면에 서식하고 있는 생물의 제거가 필요하다.

생물이 서식하고 있는 영역의 K와 Ca의 함량은 상대적으로 신선한 영역보다 높고 Mn, Fe의 함량은 낮은 것으로 측정되었다(Table 3, Figure 5). K와 Ca는 암석의 풍화와

정에서 다른 원소에 비해 빠르게 용해되는 원소로 화학적 풍화도를 지시하는 원소로 활용되고 있다(Reiche, 1943; Parker, 1970; Nesbitt and Young, 1982). 또한 Mn, Fe는 표면변색을 유발하는 주요 원소로 볼 수 있다. 따라서 P-XRF 분석결과를 토대로 기존에 활용되고 있는 화학적 풍화지수를 정량적으로 산출할 수 없지만 상대적인 함량의 차이를 감안할 때, 생물의 안쪽에서는 화학적 풍화도 발생한 것으로 유추할 수 있다.

생물에 대한 보존처리 후에 표면을 관찰한 결과에 의하면 마애불의 표면은 상당부분 갈색으로 변색된 것이 확인되었다. 따라서 생물에 의한 X-선의 간섭, 투과깊이 등에 의해 원소함량의 변화가 발생할 수 있지만 신선한 영역과의 함량비교를 통해 육안으로 확인되지 않는 화학적 풍화 여부 판단할 수 있었다.

4.4. 생물오염도 분석

신계리 마애여래좌상은 생물에 의한 훼손이 가장 심각한 상태이다. 생물은 석조문화재 주변 하천이나 호수의 유무, 수목의 거리, Canopy, 식피율 등 환경적인 요소에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 환경요인에 따라 서식하는 생물의 종, 생물량이 달라진다(Kim *et al.*, 2011). 따라서 마애불상에 미치는 환경요소들을 분석하고 Kim *et al.*(2011)에 의해 제시된 환경등급에 적용하였다. 또한 불상 표면에 서식하고 있는 생물종에 따른 생물량을 산출하여 오염도를 분석하였다.

마애불상에 영향을 미치는 환경 중 수계거리는 마애불에서 남동쪽으로 2,580m 지점에 옥물천이 위치하여 1등급에 해당한다. 수목거리는 마애불 후면의 암반과 좌우 측면을 기준으로 1m 이내에 소나무 및 다양한 관목 및 교목이 자생하고 있어 5등급으로 나타났다. Canopy는 석조문화재 주변 1m 반경의 하늘을 덮고 있는 비율이며, 식피율은 주변 10m 반경의 식물 피복율로 정의되는데 두가지 모두 100%로 5등급으로 확인되었다. 이를 종합해볼 때, 마애여래좌상은 지의류, 선대류와 같은 생물이 서식하기에 매우 적합한 환경임을 알 수 있다.

마애불상에 서식하고 있는 생물종의 생물량(*Chl. a*)를 분석하기 위해 브러쉬를 사용하여 5×5cm의 면적의 생물을 채집하였다(Kim *et al.*, 2011). 채집된 시료를 필터로 여과한 후 생물을 액화질소로 급냉시켜 마쇄기를 이용하여 마쇄하였다. 이후 아세톤 10ml를 첨가하여 원심분리하고 각 파장별 흡광도를 측정하여 생물량을 계산하였다.

생물량 산출결과, 선태류는 $2.3\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 엽상지의류는 $1.1\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 고착지의류는 $0.2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 나타났다(Figure 6). 이는 일정한 면적에서 선태류가 지의류보다 생물량이 상대적으로 높다는 것을 의미한다. 또한 지의류에서도 엽상지의류가

고착지의류보다 높게 산출되어 생물종마다 생물량의 차이를 나타냈다. 이 결과는 계절, 기후, 생물종에 따라 차이를 보일수도 있으나 보존처리가 현재 생물량이 많은 순서로 우선순위를 정하여 실시된다면 효과적인 것으로 판단된다.

Table 3. Results(ppm) of the P-XRF analysis of fresh rock and contaminants of different color.

Type	Element	Mean	Maximum	Minimum	Element	Mean	Maximum	Minimum
Fresh		<LOD	<LOD	<LOD		<LOD	<LOD	<LOD
Green		523	<LOD	5,985		3,093	<LOD	15,668
Yellow	S	<LOD	<LOD	<LOD	Cl	<LOD	<LOD	<LOD
Gray		<LOD	<LOD	<LOD		275	<LOD	4,249
Black		535	<LOD	7,281		671	<LOD	5,442
Fresh		30,446	26,461	36,491		5,492	4,277	7,184
Green		23,052	12,525	33,253		4,058	2,663	9,665
Yellow	K	28,875	24,764	36,591	Ca	5,396	3,274	10,679
Gray		25,513	13,914	36,619		5,142	2,941	31,536
Black		25,022	16,756	34,880		4,316	2,667	6,477
Fresh		126	68	221		6,111	4,468	10,325
Green		142	76	667		6,004	3,508	9,637
Yellow	Mn	126	73	188	Fe	6,750	4,548	9,349
Gray		160	65	699		6,445	3,523	9,424
Black		151	71	320		7,123	3,465	11,584

<LOD; limit of detection

Figure 5. Graphs showing element contents of fresh rock and contaminants.

5. 보존처리

손상도 평가결과에 의하면 남원 신계리 마애여래좌상은 풍화에 의한 물성감소, 입상분해 및 생물에 의한 훼손이 심각한 것으로 확인되었다. 마애불상의 장기적인 보존을 위해서는 강도가 약화된 부분에 대한 강화처리가 필수적이지만 전면에 피복된 생물 때문에 강화처리 효과가 떨어질 것으로 판단하고 생물제거에 대한 보존처리를 선행하였다. 이번 보존처리에서는 표면세정과 함께 불균형하게 있는 상석도 함께 정비하였다.

석조문화재 보존처리에서 가장 많이 시행되고 있는 방

법은 표면세정이다. 이는 보존처리에서 가장 기본이 되는 처리방법이라 할 수 있지만 부적절한 처리로 인해 돌이킬 수 없는 손상을 가져올 수 있기 때문에 주의가 요구되는 공정이다. 따라서 오염물의 종류와 훼손상태에 따라 세정 방법과 영역을 명확히 해야만 한다. 생물오염도 분석결과에 의하면 단위면적당 생물량은 선태류, 엽상지의류, 고착지의류 순으로 확인되어 보존처리시에도 생물량에 따라 순차적으로 제거하였다.

직접적인 보존처리에 앞서 조각과 문양이 없는 배면과 좌우측면을 대상으로 예비 세정실험을 실시하였다. 예비 실험은 1차로 건식세정을 실시하고 2차로 습식세척을 실

Figure 6. Microphotographs and calculated *Chl. a* amount of organism species. (A) Bryophyte, (B) Foliose lichen, (C) Crustaceous lichen.

Figure 7. Methods and results of conservation treatment on the Singyeri Maaeyeoraejwasang. (A) Pre-cleaning, (B) Dry cleaning, (C) Wet cleaning, (D, E) Before and after conservation treatment of the buddha statue.

시하였다. 예비실험 결과, 과거에 보수되었던 몰탈 처리흔 적까지 확실히 구분가능 하였다. 그러나 풍화로 인해 입상 분해가 심각한 마애불상의 상부는 고착지의류 제거시 입자가 함께 떨어질 가능성이 높은 것으로 판단되어 불상에 영향을 미치지 않는 정도까지만 제거하기로 하였다.

예비실험 결과를 토대로 건식세정부터 직접적인 보존 처리를 실시하였다(Figure 7A, 7B). 이 과정에서는 선타류와 엽상지의류를 제거하기 위해 나무 해라 및 부드러운 솔을 사용하여 조심스럽게 제거하고 양모 붓을 이용하여 잔류물을 제거하였다. 이후 습식세정은 석재표면에 증류수를 충분히 도포하여 일정시간 습윤 상태를 유지시키고 부드러운 솔을 사용하여 세척을 실시하였다(Figure 7C). 이때 입상분해가 심각한 부위에 대해서는 조심스럽게 접근하여 오염물을 제거하였으며, 암석 표면에 강하게 침착되어 제거되지 않는 고착지의류는 최소한의 범위 내에서 보존처리용 소도구를 이용하여 제거를 실시하였다.

이와 같은 보존처리 이후 선명하지 않았던 광배 및 불상의 옷 주름, 문양 등이 선명하게 확인되었다(Figure 7D, 7E). 이와 함께 생물에 의해 가려져 확인되지 않았던 표면변색이 불상의 상부인 광배부분에서 확인되었다. 이는 보존처리 전에 실시한 P-XRF 분석에서 추정되었던 부분으로 마애불상의 장기적인 보존을 위해서는 불상 상부의 강화처리와 함께 화학적인 풍화요소도 함께 고려되어야 할 것이다.

이상과 같은 보존처리 과정에서 2012년 8월 20일경부터 시작된 태풍 “볼라벤”의 영향으로 신계리 마애여래좌상 주변의 나무들이 전도되는 상황이 발생하였다. 이 중에서 마애여래좌상 정면에 위치한 참나무는 강풍에 의해 불상쪽으로 전도되었다(Figure 8). 다행히 가설비계가 설치되어 있어 마애불상이 직접적으로 충격을 받지 않았다.

또한 9월 17일에 발생한 태풍 “산바”로 인하여 마애여래좌상 진입로에 있는 나무가 쓰러져 이에 대한 현장 복구 작업을 수행하였다. 따라서 마애불상 주변에 서식하고 있는 수목은 암석 표면에 생물의 성장을 촉진시킬 뿐만 아니라 자연재해로 인해 직접적으로 물리적인 충격을 줄 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 향후 보존처리시 주변 수목에 대한 제거도 실시되어야 할 것이다.

6. 고찰 및 결론

남원 신계리 마애여래좌상은 중립질 염리상화강암으로 조각되어 있다. 이 암석은 전체적으로 구성광물의 함량은 유사하지만 흑운모의 변성도에 따라 마애불상 상부는 하부에 비해 상대적으로 변성을 많이 받은 것으로 확인되었다. 이 마애불상이 조각된 이후 동일한 풍화작용을 받아왔다는 상황을 고려할 때, 이러한 암상의 차이는 풍화도와 상당한 연관성이 있는 것으로 나타났다. 마애불상의 하부는 현재까지 치밀한 조직을 보이는 반면 상부는 입상분해가 심각한 상태이다. 또한 초음파속도 측정결과에서도 하부에 비해 상부의 물성이 상당히 감소한 것으로 확인되어 하나의 암체에서도 암석학적 특징에 따라 풍화도의 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 따라서 향후 보존처리시 암석학적 특성을 고려하여 상부에 대한 강화처리가 요구된다.

마애여래좌상에 대한 손상도 평가결과, 생물에 의한 훼손이 가장 심각한 것으로 확인되었다. P-XRF 분석결과에 의하면 생물이 서식하고 있는 일부 영역에서 S와 Cl이 검출되었다. 이 원소들은 암석의 성분 또는 외부로부터 유입된 성분과 반응하여 2차 훼손을 발생시킬 수 있어 생물의 제거가 필요한 것으로 나타났다. 생물의 성장에 영향을 주

Figure 8. Images showing brought down the tree by typhoon.

는 환경요소를 분석한 결과, 수목거리, Canopy, 식피율에서 환경등급이 5등급으로 확인되어 마애불상은 지의류, 선태류와 같은 생물이 서식하기에 매우 적합한 환경으로 나타났다. 또한 생물종에 따른 생물량(*Chl. a*)을 계산한 결과, 선태류는 $2.3\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 엽상지의류는 $1.1\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 고착지의류는 $0.2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 측정되어 생물량이 높은 순서대로 보존처리를 실시한다면 효과적일 것으로 분석되었다.

이상과 같은 손상도 평가 결과를 토대로 예비세정, 건식세정, 습식세정 순으로 보존처리를 실시하였다. 보존처리시 입상분해가 심각하고 고착지의류가 분포하는 영역은 암석에 손상을 가하지 않는 범위에서 실시하였다. 보존처리 후 생물에 가려져 있는 불상의 형태가 선명하게 확인되었으며 이와 함께 입상분해 및 표면변색 발생영역이 추가로 확인되었다. 따라서 향후에 불상 상부의 강화처리와 함께 화학적인 풍화요소에 대한 보존처리도 함께 고려되어야 하겠다.

또한 마애불상 주변에 서식하고 있는 수목은 생물이 서식할 수 있는 환경을 조성할 뿐만 아니라 태풍, 산불과 같은 자연재해로 인해 문화재에 직접적인 물리적 충격을 가할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 나무가 전도될 경우, 신계리 마애여래좌상에 닿는 거리에 있는 수목들은 필수적으로 제거해야 할 것이다.

REFERENCES

Cultural Heritage Administration in Korea, 2013, Detail description of Namwon Singyeri Maeyeoraewasang (Rock-Carved Seated Buddha Statue). www.cha.go.kr. (in Korean)

Hong, S.H. and Hwang, S.K., 1984, Geological Report of the Gurye Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining & Materials. (in Korean)

Hong, S.S., Kim, Y.J. and Kim, J.B., 1988, Petrochemical Study on Namweon Granite Body in the Namweon Area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 132-146. (in Korean with English abstract)

Hong, S.S., Yun, H.S. and Lee, B.T., 2004, Correlation of mineralogical and textural properties with mechanical qualities of granite dimension stone from the Namwon area, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 14, 105-121. (in Korean with English abstract)

Illiev I. G., 1967, An attempt to measure the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. *Proceedings of the First International Congress, International Society of Rock Mechanics, Lisbon*, vol. 1, 109-114.

Jo, J.H., Jo, Y.H., Chun, Y.G., Choi, J.H. and Lee, C.H., 2010, Precisely nondestructive diagnosis and slope stability of the Bonghwa Bukjiri Maeyeoraewasang (rock-carved seated Buddha statue), Korea. *Journal of Conservation Science*, 26, 121-132. (in Korean with English abstract)

Jo, J.H., Lee, C.H., Kim, J. and Morii, M., 2012, Deterioration evaluation and material characteristics of the Usuki Stone Buddha Statues in Oita, Japan. *Journal of Conservation Science*, 28, 39-52. (in Korean with English abstract)

Jo, Y.H. and Lee, C.H., 2011, Making method of deterioration map and evaluation techniques of surface and three-dimensional deterioration rate for stone cultural heritage. *Journal of Conservation Science*, 27, 251-260. (in Korean with English abstract)

Kim, D.H. and Lee, B.J., 1984, Geological Report of the Namweon Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining & Materials. (in Korean)

Kim, O.J., Hong, M.S., Yun, S.K., Park, H.I., Park, Y.D., Kim, K.T., Lee, H.Y. and Yoon, S., 1964, Geological Report of the Unbong Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining & Materials. (in Korean)

Kim, Y.J., Kim, O.J. and Lee, O.M., 2011, The Community of Aerial Algae and the Biological Pollution Coverage at 9 Stone Cultural Heritages in Korea. *Journal of Conservation Science*, 27, 145-154. (in Korean with English abstract)

Lee, C.H., Choi, S.W. and Suh, M., 2003, Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa Temple, Republic of Korea. *Geotechnical and Engineering Geology*, 21, 63-77.

Lee, C.H., Chung, Y.S., Kim, J. and Lee, J.E., 2005a, Behavior interpretation and secondary degradation of the standing sculptured Buddha at the Yongamsa Temple, Ogcheon, Korea. *Journal of Conservation Science*, 17, 83-94. (in Korean with English abstract)

Lee, C.H., Jo, Y.H. and Chun, Y.G., 2009, Establishment of

- Ultrasonic Measurement and Correlations of Direct-Indirect Method for Weathering Evaluation of Stone Cultural Heritage. *Journal of Conservation Science*, 25, 233-244. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Kim, J., 2011a, Damage evaluation and conservation treatment of the tenth century Korean rock-carved Buddha statue. *Environmental Earth Science*, 64, 1-14.
- Lee, C.H., Lee, M.S. and Suh, M., 2005b, Safety interpretations of the discontinuity and weathering characteristics of the Gaheungri Triple Buddha, Yeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 401-413. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.M., Jun, B.K., Shin, E.J. and Lee, C.H., 2011b, Detailed deterioration diagnosis and analysis of site environment for the Tae'an Dongmunri Maaesamjonbulipsang (rock-carved standing triad Buddha statue), Korea. *Journal of Conservation Science*, 27, 381-393. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.M., Lee, C.H. and Kim, J., 2010, Detailed deterioration evaluation and analysis of conservation environment for the Seosanmaesamjonbulsang(rock-carved triad Buddha in Seosan), Korea. *Journal of Conservation Science*, 26, 277-294. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.M., Lee, M.S., Chun, Y.G., Lee, J.M. and Morii, M., 2012, Weathering characteristics according to seawater immersion of the Magai Wareishi Jizo (buddhist statue carved on rock surface) in Hiroshima, Japan. *Journal of Conservation Science*, 28, 329-341. (in Korean with English abstract)
- Lee, T.H. and Lee, K.H., 2001, Rock carved Buddha of Korea. 15. (in Korean)
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.
- Parker, A., 1970, An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*. 501-504.
- Reiche, E., 1943, Graphic representation of chemical weathering of rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 13, 58-68.
-