캄보디아 바이온 양식 관음보살상의 풍화특성과 보존처리 상태평가

최명주 | 이명성¹ | 유지현 | 전유근* |

Kim Sothin** | In Sovann** | Oum Sineth**

국립문화재연구소 보존과학연구실, *한국문화재단 국제교류팀, **Angkor Conservation Office

Weathering Characteristics and Condition Assessment Conservation Treatment for Bayon Style Avalokitesvara, Cambodia

Myoungju Choie | Myeong Seong Lee¹ | Ji Hyun Yoo |

Yu Gun Chun* | Kim Sothin** | In Sovann** | Oum Sineth**

Conservation Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

*International Cooperation Team, Korea Cultural Heritage Foundation, Seoul, 06153, Korea

**Angkor Conservation Office, Siem Reap, Cambodia

¹Corresponding Author: mslee75@korea.kr, +82-42-860-9485

초 록 캄보디아 앙코르 보존소에 소재하는 관음보살은 13세기 바이온 양식의 석상으로, 중립의 장식질 잡사암으로 조성되었으며 석재 표면에 형성된 담갈색 풍화면에서는 방해석이 관찰되었다. 석상의 상태평가 결과, 박리와 균열의 중첩발생으로 인한 파편화 및 박락으로 인한 물리적 훼손이 심각하였다. 특히 물리적 훼손부 및 주변은 초음파속도가 낮아 입자의 결합력을 향상시킬 수 있는 보존처리가 필요한 상태였다. 이에 따라 석상의 보존환경을 고려한 염풍화의 방재 및 물리적 안정성 확보를 위하여 에틸 실리케이트계 강화제 및 석재와 유사성분의 석분을 배합하여 충전하고 노후된 보수물질을 교체하였다.

중심어: 관음보살상, 박리·박락, 초음파 물성평가, 보존처리

ABSTRACT The Bayon style Avalokitesvara statue from the 13th century Angkor period is on display at the Cambodia Angkor Conservation Office. This statue is composed of dark green felthspathic greywacke, the surface of which has been shown light brown discoloration, detected calcite crystallization. As a result of condition assessment, the statue was damaged due to overlap scaling and cracking. Ultrasonic tests have investigated remarkable physical weathering area, flaking and fragmentation in lower velocity. The physical condition of the statue requires a conservation method that improves the binding power. To protect against salt weathering and to ensure physical stability, new conservation material composed of mixed ethyl silicate and sandstone powder similar to that composing the statue was created. The material affected by damage was removed and replaced with the new conservation material.

Key Words: Avalokitesvara, Scaling and flanking, Ultrasonic evaluation, Conservation treatment

1. 서론

캄보디아의 시엠레아프 주에 있는 시엠립은 인도차이나 반도에서 크메르 왕조가 번성했던 9세기부터 약 15세기까지의 수도를 의미하는 앙코르라 불렸으며, 당대 문화유산의 집합지로 알려져 있다. 앙코르 일대에는 왕권의 강화 및 신앙 숭배 목적에 의해 수많은 사원이 건립되어 동남아시아 건축예술을 보여주는 유적 및 석조문화재가 다수 분포하며 1992년 세계문화유산으로 등록되었다.

특히 앙코르 톰(Angkor Thom)은 앙코르 시대의 최전성기인 12세기에 재건되어 오늘날까지 전해오게 된 마지막 수도성곽으로서 문화, 종교 및 상징적 가치와 더불어 고도의 건축, 고고 및 예술적 의의를 포함하는 동남아시아의 주요한 고고유적이다(UNESCO, 2018). 수도를 재건한 자야바르만 7세는 불교공인으로 왕권을 강화하고 크메르 제국의 최전성기를 누린 인물로, 이 시기의 유적에서 앙코르 불교 예술의 흐름을 파악할 수 있다.

1911년 앙코르 톰 인근의 Don Tei(Trapen Dountey)라 불리는 호수의 서측에서 6 m 높이의 미완성된 고대 테라스와 함께 그 전면에 3.3 m 높이의 관세음보살(Avalokitesvara) 석상이 발견되었다(Figure 1A). 이 석상은 팔의 물리적 손상부를 제외하면 비교적 양호한 상태였으며, 탈락한 팔은 석상의 하단에 놓여 있었다. 석상의 좌측은 첫 번째와 두 번째 팔이, 우측에는 세 번째 팔이 온전한 상태로 남아 있었다. 이후 1926년 Mr. Henri Marchal에 의해 철심 및 시멘트로 분리된 손목을 접합한 기록이 있다(EFEO, 1911).

한편 캄보디아의 석조문화재는 주로 암석학적 특성, 전암대자를 측정 및 화학분석을 토대로 한 재질의 분류와 채석 산지 추정, 기후적 특성에 의한 풍화 원인 및 양상에 대한 연구가 진행되어 왔다(Hosono *et al.*, 2006; Siedel *et al.*, 2010; Uchida and Shimoda, 2013; Wedekind *et al.*, 2016; Hughes and Howind, 2016). 또한 동시대 바이온 스타일 석상에 대한 보존과학적 연구는 Carò and Douglas(2013)의 재질분석 및 산지추정에 관한 연구가 있으며, 앙코르 유적에서 발생하는 윤곽박리의 형성원인이 방해석의 결정화 및 광물의 열팽창에 의한 것으로 추정된다(Wedekind *et al.*, 2016).

그러나 문화재를 대상으로 재질 및 풍화요인의 분석이 적절하게 실시되었더라도 보존처리자에게 유용한 방법 제안 및 자료 제공이 수행되지 않는 경우 보존을 위한 분석과 처리 과정에서 긴밀성이 낮을 수 있다. 따라서 석조문화재

의 적절한 보존처리 및 안정성 확보를 위해서는 문화재의 풍화상태 평가 및 예측을 통한 적합한 후속조치의 제안과 이를 기반으로 한 보존처리법의 시행, 처리 후 재평가를 실시하여 처리법의 효과를 검증하는 과정이 필요하다.

이 연구에서는 캄보디아 앙코르 톰 인근에서 발견된 관음보살상의 구성암석을 동정하고 표면 풍화층을 분석하였으며, 석상에서 발생하는 물리적 훼손양상을 비파괴적으로 평가하였다. 이를 바탕으로 향후 진행될 물리적 훼손의 예측과 함께 캄보디아 현지에서 보존처리를 실시하였으며, 처리 후 모니터링을 통해 처리법의 효과를 확인하였다. 이 결과는 한국과 캄보디아 양국의 기관 간 상호 협력기반 조성 및 보존기술 증진 도모에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 현황 및 연구방법

2.1. 위치 및 현황

연구대상인 관음보살상은 앙코르 톰의 북동부에 위치한 프놈 데이(Phnom Dei) 사원에서 약 1 km 떨어진 돈 테이(Don Tei) 사원의 호수 인근에서 발견되었다. 이후 유물의 이전 시기는 명확하지 않으나 사진기록상으로는 1926년에서 1967년 사이에 파리극동학원(École française d'Extrême-Orient, EFEO)의 산하에 설립된 Angkor Conservancy로 이전되어 소장되고 있다. 이 기관은 개편을 거듭한 이후 현재 정식 명칭은 Angkor Conservation Office이며, 캄보디아의 문화예술부인 Ministry of Cultural and Fine-Arts에 소속되어 있다. 위치는 시엠립의 중앙과 앙코르 문화유산 구역을 가로지르는 시엠레아프주 강의 중하류부와 60번 도로의 교차지이다(Kim, 2016)(Figure 1A, 1B).

석상이 위치했던 유적지는 오래된 층적층이 기저를 이루며 북동 방향 인근에 중생대 사암으로 형성된 쿨렌산(Kulen Mt.)이 인접한 지역이다. 이 산은 앙코르 시대 수도권에 사원을 비롯한 석조문화재를 조성하기 위한 석재 수급지로 알려져 있다(Uchida and Shimoda, 2013)(Figure 1C). 1900년대에 석상을 수습한 EFEO는 프랑스가 인도-차이나 반도를 점령하며 문화유산을 연구 및 보존하기 위해 설립된 아시아 연구학교이다. 1907년부터 앙코르 유적지의 보존에 참여하였으며, 이 외에도 캄보디아 전역의 유적 및 문화재를 보존 및 복원한 기록이 있다(EFEO, 2018).

돈 테이의 관음보살상은 1911년 기록에서 식생의 피복

Figure 1. Object, location and geological distribution of study. (A) Avalokitesvara statue made by sandstone in Angkor Conservation Center. (B) The location change of study object (U.S. Army Map Service, 1954). (C) Geological distribution in study area (Save Cambodia's Wildlife, 2006).

Figure 2. Conservational history of study object. (A) Illustrate when the object was founded. (B, C) Before conservation from EFEO. The statue covered by biofilm. (D) The condition after conservation in 1926. The statue treated 2 arms using iron piece and cement. (E, F) The statue moved Angkor Conservation Center with cleaning. Shoulders and left leg was damaged by scaling and flanking. (G) The back side of statue in 1970. (H) Before conservation in 2016. (Source of B~G : EFEO, 2018)

과 파손된 팔의 조각이 관찰되었다. 1926년 EFEO는 철심 및 콘크리트를 이용하여 탈락한 일부 부재인 양측의 네 번째 손목 두 점을 복원하였다. 이후 유물 이전 및 식생 세정과 함께 왼쪽 세번째 팔의 추가 복원이 실시되었으나 완전한 복원이 이루어진 것은 아니었으며, 오른쪽 네 번째 팔에서 재탈락이 발생한 것을 1967년 자료에서 확인할 수 있다(Figure 2A~2F).

또한, 석상의 양쪽 어깨 및 왼쪽 다리에서 박리·박락의 발달이 관찰된다. 1970년 사진에서는 후면의 오염물 및 식생 일부가 제거되어 추가적인 세정작업이 실시된 것으로 판단된다. 2016년 보존처리 이전에는 왼쪽 다리의 박락이 두드러지게 발생하여 석상 표면의 유실이 확인되며 오른쪽 세 개의 팔은 복원되지 않은 상태이다(Figure 2G~2H).

석상은 현재 앙코르 보존소의 지붕이 있는 보호각에 소장되어 있으며, 박리·박락 이외에도 다양한 풍화양상이 관

찰된다(Figure 3A, 3B). 석상의 머리와 네 쌍의 팔은 여러 조각으로 파손되었으며, 이로 인해 유실 및 복원을 반복하고 있다. 석상의 전면에 고르게 분포하는 다양한 크기의 균열은 서로 이어져 망상을 이루고 박리와 중첩되어 수 cm 두께의 박락부가 발생하고 있다(Figure 3C~3F). 석상의 하부는 오염물이 피복되어 있으며, 좌측 다리 및 팔의 보수부에서 다양한 보존처리 흔적이 관찰되어 1926년 이후에도 지속적인 보존처리를 받은 것으로 보인다(Figure 3G~3I).

2.2. 연구방법

이 연구에서는 캄보디아 앙코르 시대 유적에서 발견된 보살상의 재질을 동정하고 석상에서 발생하는 물리적 훼손 양상을 평가하였다. 이를 바탕으로 향후 진행될 물리적 훼손의 예측 및 적합한 처리법을 제안하였으며, 앙코르 보존

Figure 3. Storage environment and weathering aspect of object. (A, B) Various statue and study object in Angkor Conservation Office. (C~F) Physical weathering in Avlokitesvara Statue. (G) The legs covered soil. (H) Pre-restoration part in the past. (I) Brown colored pre-restoration material.

소에서 보존처리를 실시한 후 재평가를 통하여 제안한 처리법의 적합성을 확인하였다.

이를 위해서 우선 관음보살상의 재질적 특성을 판단하기 위하여 육안관찰을 실시하고, 암석의 자화강도 분포를 파악하기 위하여 ZH Instruments사의 CZ/SM-30 모델로 전암대자율을 측정하였다. Leica사의 DM2700 P 모델 편광현미경으로 석재의 표면에서 수습한 미량 시료의 광물조성을 파악하고 JEOL사의 JSM-IT300LV 모델의 SEM-EDS 분석기로 석재의 표면에서 발생하는 조암광물의 조직 및 풍화특성을 관찰하였다.

석상의 표면에서 두드러지게 발생하고 있는 물리적 풍화에 대하여 훼손양상을 분류 및 도면화하고 점유 면적비를 통해 훼손율을 산출하였으며, Proceq사의 PUNDIT lab 모델의 초음파 탐상기로 석재의 물성을 파악하고 2D 모델

링을 실시하였다. 작성된 훼손지도 및 2D 모델링은 병합하여 물리적 풍화와 물성의 분포를 비교하였다. 한편, 관음보살상의 종합적 훼손도 평가 결과를 토대로 현지에서 적합한 보존처리를 실시하였다. 보존처리 후에는 박리·박락에 의해 물성 저하가 두드러졌던 영역에 대하여 초음파 탐사를 재실시하여 보존처리 효과를 검증하였다.

3. 재질특성 및 비파괴 진단

3.1. 재질 및 풍화면 분석

관음보살상의 재질과 풍화특성을 파악하기 위하여 육안 관찰 및 전암대자율 측정을 실시하였다. 석상은 입도 및 색상이 균질한 중립질의 암녹색 사암으로, 탈락 단면에서 얇

Figure 4. Geological character of object. (A) Dark green sandstone in section of arm. (B) Distributional character of magnetic susceptibility. (C) Mineral composition and texture of object under polarizing microscope. (D) SEM-EDS mapping result of weathering surface of object. The Ca iron distribution in outer layer of object. (E) Measuring point of SEM-EDS in structure. 1; Calcite, 2; Hematite, 3; Apatite, 4; Plagioclase, 5; Quartz, 6; Clay mineral.

Table 1. SEM-EDS analysis result on the surface of sandstone from object(Oxide %)

Spectrum Label	1 (Calcite)	2 (Hematite)	3 (Apatite)	4 (Plagioclase)	5 (Quartz)	6 (Clay)
Na	-	-	1.28	5.99	-	7.88
Mg	0.39	3.50	-	0.56	-	3.75
Al	2.66	6.89	3.85	21.79	0.28	17.87
Si	11.26	25.15	9.09	62.40	99.27	56.86
P	-	-	38.26	-	-	-
K	0.55	0.90	-	-	-	-
Ca	82.07	7.86	46.50	6.38	-	1.82
Ti	-	-	-	0.23	-	1.30
Mn	0.90	1.19	-	-	-	-
Fe	2.18	54.51	1.02	2.65	0.44	10.53
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

은 담갈색 풍화층을 확인하였다. 한편 암석의 자화특성을 수치로 나타내는 전암대자율은 평균값이 $0.33(\times 10^{-3}$ SI unit)으로, 0.5 이하의 영역에 집중적으로 분포한다(Figure 4A, 4B).

석상에서 박락된 미량시료를 수습하여 편광현미경으로 관찰한 결과, 암녹색 사암은 구형도가 낮고 원마도가 아원력 내지 원력이며, 좋지 않거나 보통의 분급도를 가지며 화산암편이 혼재된 것이 특징인 장석질 잡사암(Felthspathic greywacke)이다. 주구성광물은 석영, 알바이트 쌍정이 있고 단일결정상 내지 밀집된 래스(lath)상으로 관찰되는 사장석, 유리질 화산암편류 등이며 부구성광물로 각섬석과 녹니석이 있으며 기질은 점토광물로 이루어져 있다(Figure 4C).

석재의 표면에서 관찰되는 화학 성분의 분포양상 파악 및 광물별 성분비를 통한 광물의 교차검증을 위하여 SEM-EDS 분석을 실시하였다. 그 결과, 담갈색의 풍화층이 형성된 석재의 최외곽부는 내부(신선부)보다 상대적으로 공극이 적고 조직이 치밀하였으며, Ca이 농집되어 분포하였다(Figure 4D). 방해석은 공극 및 균열을 채우는 비늘상의 결정으로 관찰되며, 적철석은 미량의 망간을 함유하며 결정면을 이루었다. 주상을 이루는 인회석과 판상으로 풍화되는 사장석, 비교적 풍화에 강한 석영 및 기질을 이루는 점토광물이 관찰되었다(Figure 4E, Table 1).

3.2. 비파괴 상태진단

3.2.1. 물리적 훼손도 평가

탈락과 박리·박락 등 물리적 풍화가 두드러지게 발생하는 석상의 훼손상태를 정량적으로 파악하기 위하여 훼손지도를 작성하고 훼손율을 산출하였다. 이를 위하여 정밀 실

측이 실시되지 않은 연구대상의 조사 가능한 영역의 사진을 선별하여 기준으로 삼고 도면화하였다.

훼손지도는 석상의 표면에서 육안으로 관찰되는 훼손유형 중 두드러지게 발생하는 물리적 풍화를 대상으로 작성하고 획득한 픽셀데이터의 점유면적비를 통해 훼손율을 산출하였다. 석상의 전면에서 가장 높은 훼손율(18.0%)을 보이는 박리와 박락은 석재 표면부의 손실이 발생하는 과정 및 결과로 판단하여 세분화하였다. 균열의 훼손도 결과는 독립적으로 발생한 단일균열 21개와 균열들이 서로 연결되어 발생하는 망상균열 9개를 합산한 결과이다(Figure 5).

석상의 전신에서 관찰되는 윤곽박리(Contour scaling)는 균열과 중첩되어 발생하고 있으며, 특히 망상 균열의 발달로 인해 석재가 판상으로 박락되고 있다. 석재는 층리와 같은 퇴적구조를 가지고 있지 않으나 석상의 윤곽을 따라 비교적 일정한 두께로 분리되어 있다.

균열은 목이나 팔과 같이 석상의 취약부를 관통하는 것과, 박리 영역 내 얇은 심도로 발달하는 망상균열로 분류된다. 특히 박리 영역 내에 분포하는 균열은 윤곽을 따라 발달한 불연속면을 세분하여 파편화시키는 역할을 하고 있어 박락을 발생시키는 데에 주요한 원인으로 작용한다. 따라서 석상의 머리, 배 등 시대적 특성을 보이는 도상의 주요 부분에서 풍화가 진행되고 있어 적극적인 대처가 필요하다.

3.2.2. 초음파 물성진단

조직이 균질한 석재의 물리적 강도 변화는 대개 석재의 공극 분포변화 및 불연속면의 형성에 의한 것이 많으며, 이러한 결과는 초음파의 속도 차를 비교하여 비파괴적으로 진단이 가능하다(Lee *et al.*, 2009). 간접전달법을 통한 초

Figure 5. Weathering mapping of Avalokesvara. (A) Selection and drawing of buddhist icon to map physical weathering. (B) Categorization of weathering factor. (C, D) Analysis result of weathering mapping. Scaling is occurred on the surface of study object at high weathering rate. Weathering rate of crack is summed number of single and pattern.

음파 탐사로 파악된 저속도대의 보존처리 전·후 물리적 상태 변화를 판단하기 위하여 건전부 측정값의 일치성을 확인한 후 동일 지점의 속도변화를 비교하였다(Figure 6).

석상의 물리적 풍화 상태는 크게 균열 및 박리에 의해 물리적 훼손이 심각한 손상부, 이미 물리적 손실이 발생하였거나 손상부로부터 영향을 받고 있는 주변 영역인 취약부, 물리적 풍화가 진행되지 않은 건전부로 분류할 수 있다.

균열에 의한 불연속면과 윤곽박리의 경계 영역 형태로 관찰되는 손상부는 총 11지점이며 400~800 m/s의 범위 내에서 평균 561 m/s의 값을 보여 물성이 매우 낮음을 확인하였다. 박락된 영역과 박리 및 균열의 주변부처럼 풍화에 의한 유실이 이미 발생하였거나 추가적 훼손이 우려되는 취약부는 총 10지점이며 1,280~2,300 m/s의 영역에서 평균속도가 1,950 m/s로 나타났다. 한편 표면상에서 물리적 결함이 관찰되지 않은 건전부는 총 58지점이며, 1,570~3,090 m/s의 속도구간에서 평균 2,310 m/s의 비교적 높은 속도분포를 보였다.

이와 같은 결과를 통해 박리·박락 및 균열에 의한 물리

적 결함부는 현저한 저속도 영역을 형성함을 알 수 있었다. 특히 저속도 영역 중 양 어깨와 왼쪽 다리는 박리와 망상균열이 중첩되어 박락이 진행되고 있어 안정성을 확보하기 위한 처리 및 모니터링이 필요한 상태였다. 박리와 균열이 중복되는 지점 중 아직 박락이 발생하지 않은 지점인 두상, 배 및 오른쪽 다리는 부재의 유실이 진행될 가능성이 있다.

4. 보존처리 및 모니터링

비파괴 조사를 통해 실시한 석조 관음보살상의 상태진단 결과를 토대로 현지에서 가능한 보존처리 방법을 제안하고 처리를 실시하였다. 현재 불상은 보존처리 과정에서 높은 공극률을 보이는 사암 석재의 특성과 캄보디아의 높은 온·습도, 보존환경 등을 종합적으로 고려해야 한다. 따라서 탄산염으로 용출되어 2차 피해를 발생할 우려가 있는 석고 파우더나 모르타르보다 원암과 유사한 색상 및 광물조합의 사암 파우더와 변질의 우려가 적은 실리카이트 에폭시 수지를 이용하여 충전해야 한다. 한편 에폭시 수지와 사암 파우더

Figure 6. Ultrasonic measuring analysis on the study object. (A) Measuring point of object. (B) 2D modeling result from ultrasonic velocity on the statue. The grey color is unmeasured part due to weakness. (C) Data list of ultrasonic measuring. Red; Weathered part, Green; Weak part, Black; Sound part. (D) Distribution of ultrasonic velocity before conservation.

는 연구대상과 유사한 암종인 장석질 암편사암 내지 석질 잡사암으로 구성된 프레아 칸(Preah Kkan) 석재의 균열 및 접합부에 적용된 사례가 있다(World Monuments Fund, 1992; 1994).

2016년 11월부터 이듬해 4월까지 실시된 보존처리는 먼저 부드러운 솔 및 메스를 이용하여 석상의 표면에 피복된 먼지와 곤충집 등의 오염물을 건식으로 세정하였다(Figure 7A). 이후 종이를 증류수로 부착하고 그 위에 종이 가루 및 점토를 동일비로 배합하여 도포하여 완전건조 후 제거하는 탈염처리를 실시하였다(Figure 7B~7D). 석재 표면에 발생한 지의류는 과산화수소를 도포 후 부드러운 칫솔 및 증류수로 세정하여 제거하였다(Figure 7E~7F).

물리적 훼손영역에 대해서는 미세균열부에 배합 및 함침이 용이하며 높은 강도를 가진 Silka사의 에폭시 레진 Sikadur 300을 주사기로 주입하였다. 육안으로 간극이 관찰되는 비교적 큰 규모의 균열은 0.2~5 mm의 균열에 고르게 주입이 가능하고 습기에 영향을 받지 않으며 접착력이 강한 Silka사의 에폭시 수지 Sikadur 52를, 손실부가 큰

영역은 Sikadur 52와 사암 파우더를 배합하여 충전하였다. 부재의 탈락 후, 과거에 보존처리가 시행되었던 팔은 열화에 의해 결합력이 낮아진 상태이므로, 부식이 발생하지 않는 스테인레스 봉으로 교체하고 충전제를 이용하여 재접합하였다. 처리 후에는 약 3일간 처리부를 고정시켜 결합력 및 안정화를 향상시켰다(Figure 7G~7I).

상태진단 과정에서 인지된 손상부 11지점에 대하여 처리 후 상태 변화 및 안정화 여부를 판단하기 위하여 초음파 탐사법으로 모니터링하였다. 그 결과, 평균 561 m/s였던 저속도 지점의 속도가 처리 후 평균 2,177 m/s로 상승하였다. 특히 물리적 손상이 심각했던 보살상의 양 어깨 및 팔 부분의 손상부 7지점에 대하여 처리 전 1차 상태조사(2016년), 처리 후 2차 부분 상태조사(2017), 3차 상태조사(2018)를 실시하였다. 평균 550 m/s의 속도를 보였던 상반신 손상부는 처리 후 평균 2,078 m/s로 상승하였으며, 3차 조사에서 처리 직후와 유사 속도인 2,031 m/s를 보여 처리 효과가 지속되고 있음을 확인하였다(Figure 8).

Figure 7. Conservation process for Avalokitesvara statue in Ankgor Conservation Office. (A ~F) Dry, wet cleaning and desalination on the surface of object. (G, H) Filling the crack and missing part with epoxy resin & sandstone powder. (I) changing of the conservation material.

5. 고찰 및 결론

캄보디아 돈 테이 지역에서 발견하여 현재 앙코르 보존소에서 보관하고 있는 석조 관음보살상은 1926년에서 1967년 사이 박리·박락에 의한 물리적 손실이 발생하였고, 이후 지속적으로 석재가 파편상으로 유실되고 있어 풍화양상 파악 및 보존방안의 마련이 필요한 상황이었다. 석상에 사용된 암석은 암녹색 장석질 잡사암으로, 석재의 표면에 방해석이 함유된 담갈색 풍화층이 형성되어 있는 상태이다.

캄보디아 석조문화재를 대상으로 한 선행연구의 탐색 및 비교분석 결과, Carò and Douglas(2013)가 연구한 자야바르만 7세의 바이온 양식 조각상 및 석재 채석지 추정되는 트리아스기 사암층과 광물 조성 및 기재적 특징이 유사하여 Svay Damnak 지역이 채석 산지로서 가능성이 있다. 또한, Uchida and Simoda(2013)이 전암대자를 측정법

을 근거로 연구 대상과 동일한 시기에 제작된 바이온 사원 석재의 원산지로서 제시한 쿨렌산의 동남 방향 산사면에서 $0.5(\times 10^{-3})$ SI unit 이하의 값이 분포하므로 이 지역도 원산지로서의 가능성을 가지고 있다.

풍화층의 공극에 비늘 결정상으로 관찰되는 칼슘 이온의 결정체는 석재 내부에서 용출되었거나 과거의 보존처리 시 사용된 석회가 결정화되어 발생하고 있는 염풍화의 산물일 것으로 추정되지만, 석재 내부의 조성구 직접적인 비교분석이 불가능하므로 석재에 분포하고 있는 박리·박락의 주요원인이라고 판단할 수는 없다. 그러나 온·습도가 높은 환경적 요인에 의해 지속적인 염풍화가 발생할 경우 공극 내 결정으로 인한 압력과 공극률을 증가시켜 석재의 결합력이 약해져 물리적 풍화를 가속시킬 가능성이 있어 탈염처리가 필요하였다.

석재의 전반에 분포하고 있는 물리적 훼손 양상은 대체

Figure 8. The change of physical condition before and after conservation. (A) The comparison with before and after conservation in major low velocity part. (B) 2D modeling result of ultrasonic velocity after treated in 2018. (C) List of ultrasonic velocity of weathered point before(2016) and after(2018). Orange; Weathered point, Blue-green; Treated point. (D) Distribution of velocity changed with before and weak and sound. (E) The monitoring result of the velocity in weathered part on upper body.

로 형상에 의한 취약부의 탈락 및 유실 또는 표면에 분포하는 박리와 균열의 증첩발생으로 인한 박락으로 관찰된다. 박리의 분포영역은 망상균열의 발달로 인해 물리적 풍화가 촉진되어 석재 표면이 파편화 및 박락되는 풍화특성을 보이며, 초음파 탐사에서 현저한 저속도 영역을 이루었다. 이러한 풍화 양상은 도상을 물리적으로 심각하게 훼손하므로 적극적인 보존대책의 마련이 요구되는 상태였다.

따라서 관음보살상의 물리적 안정성 확보와 염풍화의 제어를 위하여 안정적인 충전제의 선택이 중요하였다. 건식 및 습식 세정 후 에폭시 수지와 유사성분 석분 등의 처리제로 손실부의 크기에 따라 적합한 처리법을 적용하고, 노후된 기존의 보수물질을 제거한 후 스테인레스 환봉 삽입 및 재접합하여 보수물질에 의한 2차 훼손을 예방하고 결합력을 향상시키는 작업을 실시하였다.

보존처리 후 초음파 측정법으로 1,000 m/s 이하의 저속도 영역에 속했던 손상부를 재탐사한 결과, 취약부 내지 건전부와 유사한 속도 분포를 보여 불상에 실시한 강화, 충전

및 재접합 처리가 효과적이었음을 확인하였다. 한편, 심각한 물리적 손실을 보였던 보살상의 상체 손상부에 실시한 모니터링은 처리 후 속도의 급격한 증가를 보이고 이듬해까지 유사한 속도가 유지되어 물리적으로 안정하다고 판단된다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소 문화유산 조사연구 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 공동연구를 수행한 캄보디아의 Angkor Conservation Office에 감사드린다.

REFERENCES

- Carò, F. and Douglas, J.D., 2013, Nature and provenance of the sandstone used for Bayonstyle sculptures produced during the reign of Jayavarman VII. *Journal of Archaeological*

- Science, 40, 723-734.
- EFEO, 1911, Monuments of Cambodia Volume III. 295-296. (in French)
- EFEO, 2018, Avalokitesvara irradiant. <http://www.efeo.fr/index.php/> (February 20, 2018)
- Hosono, T., Uchida, E., Suda, C., Ueno, A. and Nakagawa, T., 2006, Salt weathering of sandstone at the Angkor monuments, Cambodia: identification of the origins of salts using sulfur and strontium isotopes. *Journal of Archaeological Science*, 33, 1541-1551.
- Hughes, J. and Howind, T., 2016, Science and Art: A Future for Stone: Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. University of the West of Scotland, Paisley, 1, 205-213.
- Kim, S., 2016, Ankor conservation office in Siem Reap, Cambodia. *Journal of Architectural History*, 25, 93-100. (in Korean)
- 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)
- Save Cambodia's Wildlife, 2006, Atlas of Cambodia: maps on socio-economic development and environment.
- Siedel, H., Pfefferkorn, S., von Plehwe-Leisen, E. and Leisen, H., 2010, Sandstone weathering in tropical climate: results of low-destructive investigations at the temple of Angkor Wat, Cambodia. *Engineering Geology*, 115, 3-4, 182-192.
- Uchida, E. and Shimoda, I., 2013, Quarries and transportation routes of Angkor monument sandstone blocks. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1158-1164.
- UNESCO, 2018, Angkor. <http://whc.unesco.org/en/list/668/> (February 20, 2018)
- Wedekind, W., Gross, C., van den Kerkhof, A.M. and Siegesmund, S., 2016, Contour scaling at the Angkor temples: Causes, consquences and conservation. *Science and Art: A Future for Stone: Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, 1, 205-213.
- World Monuments Fund, 1992, Preah khan conservation project historic city of angkor: ReportIII conservation plan. 3, 103-105.
- World Monuments Fund, 1994, Preah khan conservation project historic city of angkor: ReportV Field cambping II. 5, 1-123.
-