청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 재질특성과 손상특성 연구

Study on the Material and Deterioration Characteristics of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha in Bijung-ri, Cheongju, Korea

유지현, 최명주, 이명성*, 김유리

국립문화재연구소 보존과학연구실

Ji Hyun Yoo, Myoungju Choie, Myeong Seong Lee*, Yuri Kim

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

Received November 4, 2021
Revised November 25, 2021
Accepted November 29, 2021

*Corresponding author
E-mail: mslee75@korea.kr
Phone: +82-42-860-9081

Journal of Conservation Science
2021;37(6):778-790

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.6.15>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상은 6세기 고구려 불상의 양식을 갖춘 중요한 국가지정문화재(보물)이다. 이들 석불상의 보존현황 파악 및 보존계획 수립을 위해 보존과학적 조사를 수행하였다. 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 구성암석은 세립 내지 중립의 전형적인 흑운모화강암으로, $0.2(\times 10^{-3})$ SI unit) 미만의 낮은 대자율 분포, 구성광물에서 서로 유사한 특성을 보여 동일한 기원의 암석으로 판단된다. 석조여래삼존상은 인근 노두의 암석과 광물 조성 및 입도, 전암대자율, 지구화학적 특성이 매우 유사하였으므로 성인적 동질성이 높은 것으로 해석된다. 한편 비종리 석조불상에서는 물리적, 화학적, 생물학적 요인이 복합적으로 작용하고 있는 것으로 확인되었다. 특히 석조여래삼존상과 여래입상 모두 전면에서 탈락이, 후면에서 균열과 박리박락이 우세한 경향을 보였다. 야외에 위치한 석조여래입상에서는 입상분해와 흑색조류가 발달하여 열악한 보존환경과 함께 풍화를 가속화하고 있다. 초음파속도를 이용한 비파괴 물성진단 결과, 석조여래삼존상과 여래입상의 풍화등급은 완전 풍화된 상태(CW)로 나타나 매우 낮은 물성을 지시하였다.

중심어 석불상, 재질특성, 동질성 검토, 비파괴 진단, 손상도 평가

ABSTRACT The Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha in Bijung-ri are state-designated heritage (treasure) statues having the Buddha style of the Goryeo dynasty from the 6th century. Conservation scientific investigations were conducted to understand the preservation status of these stone Buddha statues and to establish a conservation plan. The Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha are composed of fine-medium grained biotite granite, which is considered to be of the same origin owing to their low magnetic susceptibility distribution of less than $0.2 (\times 10^{-3})$ SI unit) and similar mineral characteristics. The Stone Seated Buddha Triad has highly homogenous mineral composition and particle size, whole-rock magnetic susceptibility, and geochemical characteristics very similar to those of the nearby outcrop. It was confirmed that a combination of physical, chemical, and biological factors affects the Stone Buddha statues. In particular, both the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha tend to be chipped off from the front and cracked and scaled from the back. The Stone Standing Buddha located outdoors experiences granularity decomposition and black algae formation, which accelerate the weathering under unfavorable conservation environments. The result of non-destructive physical property diagnosis using ultrasonic velocity showed that both the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha have been completely weathered (CW), indicating very poor physical properties.

Key Words Stone Buddha statue, Material characteristics, Homogeneity investigation, Nondestructive diagnosis, Deterioration assessment

1. 서론

청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상은 삼국 시대의 청주시(당시 상당현)에 제작된 것으로 추정되는 석불상들이다. 암석을 정교하게 조각하여 만들어진 입상들은 6세기 고구려 불상의 양식적 특징을 갖추고 있으며, 당시 고구려·백제·신라의 각축장이었던 청주의 지역사 연구에도 중요한 문화유산이다. 석불상들의 역사적·예술적·학술적 가치가 인정되어 2017년에는 국가문화재(보물)로 지정되기도 하였다.

그러나 이러한 인문학적 중요성에도 불구하고 이들의 재질에 대한 정보, 구성암석의 기원, 물성 및 표면손상 등 보존현황에 대한 과학적 조사자료가 전무하였다. 주요한 석조문화유산에 대한 연구는 재질규명, 원산지 추정, 손상도 진단, 보존처리 등 다양한 분야에 걸쳐 국내외에서 활발히 이루어지고 있다(Yi *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2013; Jin *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2017). 더욱이 청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상이 국가지정문화재(보물)로 지정됨에 따라, 5년마다 정기조사가 실시되어야 하므로 석불상의 과학적 조사가 시급히 요구되는 상황이다.

따라서 청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 보존과학적 정보를 구축하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 통해 석불상의 재질을 규명하고 이들과 인근 암석과의 동질성을 검토하였으며, 석불상의 물성분석 및 손상현황 조사를 실시하여 표면손상 특성을 해석하였다. 이 연구결과는 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 장기적 관리에 중요한 정보로 제공될 것이다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상(淸州飛中里石造如來三尊像 및 石造如來立像)은 충청북도 청주시 청원구 내수읍 비종리 207-1에 위치한다(Figure 1A, 1B). 석조여래삼존상은 사자좌가 표현된 일광삼존불이라는 희소한 양식으로 조성된 6세기 중반의 대형석조불상이며, 석조여래입상은 석조여래삼존상보다 후기에 조성된 것으로 추정된다. 비종리에는 이 석불상 외에도 석조광배가 존재하고 있으나 이 또한 다른 시기에 제작된 것으로 추정된다(Kim, 2016).

청주 비종리의 석조불상들이 현대에 알려진 것은 1978년 충북대 역사과 박결순의 제보에서 기인했으며 1979년

3월 4일 문명대와 이용조에 의해 확인되어 언론에 최초로 보도되었다(Moon, 1982). 처음 발견 시의 석조여래삼존상은 세 부분으로 분리된 상태였는데 불상은 현재 위치한 언덕에 산재되어 있었으며 광배는 경작지의 한복판에 방치되어 떨어져 있었는데, 1988년에 현 언덕의 남쪽에 화강암의 대좌를 마련하고 그 위에 석조상들을 세웠다(KNUE Educational Museum, 1991).

이후 한국교원대학교 박물관에서 비종리 석조불상 일대의 지표 및 발굴조사를 수행한 결과, 비종리 사지는 삼국시대에 창건되어 18세기까지 존속하였다가 화재에 의해 소실되었으며, 언덕부분에서는 조선시대 후기의 것으로 보이는 불당의 존재가 추정되었다(KNUE Educational Museum, 1991). 당시의 발굴조사에서 석조여래삼존상의 소실된 왼쪽 협시보살상은 발견되지 않았으며 불상의 원위치도 밝혀지지 않았다. 이에 불당이 존재했던 풍화암반층 언덕에 보호시설을 세우자는 방안이 건의되어 1997년에 이르러서는 보호각의 건립이 이루어졌으며, 현재까지 석조여래삼존상을 보호하는 보존환경이 조성되어 있다(Figure 1C). 그러나 보호각의 규모가 작아 석조여래입상과 석조광배는 야외에 위치해 있으며 외부에 별도의 보호시설 없이 노출되어 있는 실정이다.

비종리 석불 세 구 중 먼저 문화재로 등록된 것은 석조여래삼존상으로, 1982년 12월 17일에 충청북도 유형문화재 제114호 비종리 석조일광삼존불상으로 지정되었다(Figure 1D). 이후 가치 제고가 이루어져 2017년 6월 23일에 국가지정문화재(보물)로 승격되었다. 이 과정에서 석조여래삼존상뿐만 아니라 석조여래입상과 석조광배가 함께 지정되어(Figure 1E) 현재에 이르고 있다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 청주 비종리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 암석기재적 특징을 밝히고, 석불 인근의 노두에 대한 분석을 병행하여 동질성을 해석하고자 하였다. 이를 위해 현장조사를 수행하여 육안관찰을 통해 암종을 분류하였으며, 구성광물의 정밀한 동정을 위해 석불에서 탈락한 미세 암편과 주변 노두 시료를 수습하여 박편제작 및 관찰, X-선회절분석(XRD), 지구화학분석을 실시하였다. 암석박편을 통한 광물 조성 및 조직 규명에는 Leica사(DEU)의 편광현미경인 DM2700 P 모델이 사용되었으며, Panalytical사(GBR)의 다기능 고분해능 X선 회절분석기인 Empyrean 모델을 통해 X-선회절분석을 실시하여 광물조성을 교차분석하였다. 석불과 인근 암석 간의 동질성을 밝히기 위한 지구화학분석은 캐나다 ACTLABS에 의뢰하

Figure 1. Location and appearance of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha. (A) Location map of study area. (B) Surrounding environment of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha. (C) Shelter of the Stone Seated Buddha Triad. (D) Stone Seated Buddha Triad. (E) Stone Standing Buddha.

여 수행하였다. 이때, 주성분 분석에는 Fusion ICP, 미량 및 희토류원소 분석에는 Fusion ICP, INAA, TD-ICP가 각각 사용되었다.

청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 물성을 파악하고 복합적인 표면손상을 해석하기 위하여 현장 조사를 통한 손상현황 기재·비파괴 진단을 수행하였다. 석불의 물질진단을 위해 Proceq사(CHE)에서 제작한 초음파 속도 측정기인 PUNDIT Lab을 사용하였으며, 위치별 초음파 속도를 토대로 2D 등고선도를 제작하여 물성분석을 수행하였다. 전압대자율은 ZH Instruments사(CZE)의 휴대용 대자율 측정기인 SM-30 모델을 사용하여 측정하였으며, 측정치는 10^{-3} 의 SI 단위로 표기하였다.

석불상들의 비파괴 진단을 위해 우선 석불의 표면에 나타나는 다양한 손상양상을 관찰하여 유형별로 정리하고 이를 도면화하였으며, 이와 함께 각 유형의 손상들을 고해상도 카메라로 촬영하여 기록하였다. 석불 표면에 존재하는 박리를 검출하고 그 형상을 파악하기 위해 FLIR 사(USA)의 적외선열화상 카메라인 SC660 모델을 사용하였다. 획득한 자료를 종합하여 손상유형에 따른 손상지도를 제작하였고 이를 근거로 손상율을 산출하여 석조여래삼존상과 석조여래입상의 복합적 손상도 해석에 활용하였다.

3. 암석학적 특성 및 동질성 해석

3.1. 암석학적 특성

석조여래삼존상 및 석조여래입상이 위치한 청주 비중리의 기반암은 중생대 쥐라기의 반상화강암으로, 이는 한 반도를 북동방향으로 가로지르며 발달한 거대한 대보화강암체의 중앙부에 해당한다. 이 일대는 반상화강암, 화강섬록암, 흑운모화강암이 분포하며, 암체의 중심부는 중립 내지 조립질인 데 반하여 연변부는 세립 내지 중립질의 양상을 띤다(Lee and Kim, 1971). 실제로 석조여래삼존상과 석조여래입상 인근에 존재하는 노두는 회색의 흑운모화강암으로 세립 내지 중립질의 입도를 보인다.

석조여래삼존상 및 석조여래입상은 모두 담회색의 세립 내지 중립질 흑운모화강암으로 구성되어 있으나 (Figure 2A) 야외에 위치한 석조여래입상은 풍화에 의해 연갈색을 띠고 있다(Figure 2B). 석조여래삼존상을 구성하는 흑운모화강암에서는 부분적으로 석영세맥이 관찰된다(Figure 2C). 구성암석의 광물조성 및 조직, 풍화에 의한 변질광물을 알아보기 위해 석조여래삼존상에서 탈락된 미세시편을 수습하였으며, 석조여래입상은 입상분해가 시료 수습이 불가능했다. 미세시편을 박편으로 제작하여

Figure 2. Petrography of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha, nearby outcrops. (A) Surface of the Stone Seated Buddha Triad. (B) Surface of the Stone Standing Buddha. (C) Quartz vein of the Stone Seated Buddha Triad. (D) Photomicrograph of the Stone Seated Buddha Triad. (E) Outcrop around the Buddha statues. (F) Photomicrograph of the outcrop. (G) X-ray diffraction patterns. (H) Magnetic susceptibility of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha. (I) Magnetic susceptibility of Buddha statues and nearby outcrop. Af: Alkali feldspar, Bt: Biotite, M: Microcline, P: Plagioclase, Q: Quartz.

편광현미경으로 관찰한 결과, 석조여래삼존상을 이루는 암석은 세립 내지 중립의 세리사이트 조직을 보이는 타형의 석영, 알칼리장석, 미사장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성된 것으로 나타났다(Figure 2D).

육안 및 편광현미경 관찰로 확인한 광물을 교차검증하기 위하여 석조여래삼존상 수습 시료에 대하여 X-선 회절 분석을 실시하였다. 이 결과에서도 석조여래삼존상과 인근 노두의 암석이 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모의 동

일 조성을 가짐을 확인할 수 있다(Figure 2G). 석불상의 미세자기화 특성을 파악하기 위한 전암대자율 측정 결과, 석조여래삼존상의 대자율은 $0.045 \sim 0.171 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 범위를 보이며 평균값은 $0.091 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 산출되었다(Figure 4A). 또한 석조여래입상의 대자율은 $0.009 \sim 0.066 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 범위에서 $0.050 (\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 평균값을 보였다(Figure 2H). 이렇듯 석조여래삼존상의 대자율은 석조여래입상에 비해 상대적으로 높은 수치로 측정

되었지만, 모두 $0.2(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 미만의 좁은 영역에 분포하는 것으로 나타났다.

3.2. 석불상 및 추정산지 암석의 동질성 해석

석조여래삼존상 및 석조여래입상 바로 인근에는 회색의 흑운모화강암 노두가 존재한다. 이 노두는 세립질 내지 중립질의 흑운모화강암으로 이루어져 석조여래삼존상과 매우 유사한 암상을 보인다. 따라서 석조여래삼존상 구성암석의 원산지를 검토하기 위해 인근의 노두(Figure 2E)에서 석불상과 유사한 암상을 보이는 시료를 수습하였고 편광현미경 분석을 실시하였다. 이 결과, 인근 노두의 암석 또한 세립질 내지 중립질 입도를 가진 타형의 석영과 반자형 내지 타형의 알칼리장석, 미사장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성된 동일한 광물조성을 보였으며(Figure 2F), X-선 회절분석 결과에서도 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모가 동정되어 석조여래삼존상과 동일한 광물조성이 확인되었다.

석불상 인근 노두의 전암대자율은 $0.012(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 에서 $0.126(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 으로 평균값은 $0.067(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이다(Figure 2I). 이는 석조여래삼존상과 석조여래입상에서 측정된 전암대자율의 분포영역을 대부분 포함하는 범위로, 양자 간의 미세자기적 유사성을 지시한다. 이어서 석조여래삼존상과 인근 노두 구성암석의 동질성 검토를 위해 지구화학적 분석을 수행하여 주성분 원소와 희토류 원소, 호정 및 불호정 원소의 함량을 측정하였다(Table 1).

석조여래삼존상과 인근 노두들의 주성분 원소 측정치를 토대로 Middlemost(1994)가 제안한 총알칼리도(total alkali-silica diagram)에 맵핑한 결과, 이들은 화성암의 분류상 모두 화강암 영역에 속하는 것으로 확인되었으며 서로 매우 유사한 성분조성을 가져 도표상에서 매우 근접 분포하였다(Figure 3A). Cheong *et al.*(2011)은 지구화학적 연구를 통해 청주 화강암체가 칼크-알칼리 계열의 중알루미나 성분의 화강암-섬록암에 속하며 섭입과 관련되어 생성되었을 가능성을 지시하였으며, 청주 화강암을 형성한 마그마가 부화된 하부지각물질의 부분 용융 산물이거나 맨틀기원의 모마그마와 지각 물질의 혼염에 의해 생성되었을 것으로 추정한다. 따라서 이 연구에서도 석조여래삼존상 및 노두의 주성분을 Nockolds(1954)가 제시한 칼크-알칼리 화강암(Calc-alkali granite)의 평균조성을 기준으로 표준화하였다(Figure 3B). 이 결과, 흑운모화강암의 주 구성광물인 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모를 이루는 주원소인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O 의 부화과 결핍 경향이 매우 유사한 것으로 나타났다.

희토류 원소는 마그마의 분화, 맨틀의 용융 등에서 기인하는 광물 정출의 진화과정을 반영하는 것으로 Taylor and McLennan(1985)의 운석 초생치로 표준화하고(Figure 3C), 호정 및 불호정 원소는 원시 맨틀조성(Pearce, 1983)으로 표준화하였다(Figure 3D). 이들 결과에서 석조여래삼존상과 노두 2의 전반적인 거동경향은 Eu의 부의 이상을 제외하면 매우 유사한 것으로 나타났다.

Table 1. Compositions of the major, minor and rare earth elements of the Stone Seated Buddha Triad and outcrops

No.	Unit	Stone Seated Buddha Triad	Outcrop 1	Outcrop 2
SiO_2	wt%	70.03	70.61	70.05
Al_2O_3	wt%	14.29	14.28	14.74
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$	wt%	1.82	1.77	1.81
MnO	wt%	0.03	0.02	0.02
MgO	wt%	0.28	0.3	0.26
CaO	wt%	1.25	1.2	0.8
Na_2O	wt%	3.81	3.7	3.29
K_2O	wt%	5.28	4.92	5.16
TiO_2	wt%	0.303	0.343	0.364
P_2O_5	wt%	0.05	0.09	0.05
LOI*	wt%	0.72	0.78	1.51
Total	wt%	97.86	98.01	98.05
Ba	PPM	1340	1460	1510
Cr	PPM	669	324	376
Hf	PPM	5	6	8
Sc	PPM	1	1	1.5
Sr	PPM	391	444	424
Ta	PPM	< 1	< 1	< 1
Th	PPM	15.6	16.7	17.8
Y	PPM	3	2	2
Zr	PPM	160	225	204
La	PPM	40.7	14.4	44.5
Ce	PPM	63	54	69
Nd	PPM	17	< 5	27
Sm	PPM	2.4	1.2	2.4
Eu	PPM	0.7	0.7	< 0.1
Tb	PPM	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Yb	PPM	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Lu	PPM	< 0.05	< 0.05	< 0.05

*LOI: Loss on Ignition

Figure 3. Geochemical graphs of the Stone Seated Buddha Triad and nearby outcrops. (A) Total alkali versus silica (TAS) diagram. (B) Major element diagram. (C) Rare earth element diagram. (D) Incompatible element diagram.

이상의 결과를 종합해 보면, 비중리 일대에 분포하는 암석은 석조여래삼존상을 구성하고 있는 세립 내지 중립질의 흑운모화강암과 동일한 암석이며, 이는 두 암석이 성인적으로 같은 종류의 암석일 가능성을 지시한다. 따라서 석조여래삼존상을 구성하는 암석은 현 위치 인근에서 조달하여 사용하였을 가능성이 높다고 판단된다. 석불상의 지근거리(0.7km)에 석화천이 흐르고 있으나 석조여래

삼존상이 큰 단일 암체를 가공하여 제작된 것이며, 현재 위치의 암상이 세립 내지 중립질로 불상의 조각과 표현이 용이함에도 불구하고 더 먼 지역에서 별도의 거대한 암석을 구하여 운반하여 왔을 가능성은 낮은 것으로 추정된다.

4. 손상도 평가

4.1. 유형별 표면손상

청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 주요 손상유형은 균열·박리박락·탈락·입상분해와 같은 물리적 손상과 갈색·흑색·황색 변색의 화학적 손상, 조류·지의류 등에 의한 생물손상으로 확인된다(Figure 4). 물리적 손상 중 균열은 수 mm 폭을 보이는 미세균열(Figure 4A)로부터 수 cm의 폭으로 나타나는 구조상 균열(Figure 4B)에 이르기까지 다양한 폭으로 발달해 있다. 균열의 방향은 수직·수평·대각선으로 고르게 나타나 특별한 방향성은 보이지 않았다. 균열에 의한 손상은 석조여래삼존상과 석조여래입상 모두 전면보다는 후면에서 뚜렷하게 발달하여 있으며, 특히 석조여래삼존상의 후면에는 미세균열이 집중적으로 분포하는 균열대가 관찰되었다.

박락과 박리는 석조여래입상에서는 거의 발견할 수 없었던 반면, 석조여래삼존상에서는 다양한 크기 및 형태로 진행된 것을 확인하였다(Figure 4C, 4D). 입상분해는 야외에 위치한 석조여래입상에서만 나타나는(Figure 4E) 이는 야외 환경요인에 의한 풍화 가속화의 결과로 판단된다. 석조여래삼존상에서는 과거 분리되어 발견되었던 불상을 접합하는 데 사용된 보존처리물질이 관찰되며(Figure 4F) 이로 인한 손상은 발견되지 않았으나 원암과는 다소 이질적인 색상과 질감을 띠고 있다.

화학적 손상으로 백색변색(Figure 4G), 황색변색(Figure 4H), 갈색변색(Figure 4I), 흑색변색(Figure 4J) 등 다양한 색상의 변색이 석조여래삼존상의 상부와 후면에서 넓은 부위에 분포하는 것으로 조사되었다. 생물학적 손상으로 지의류(Figure 4K)와 조류(Figure 4L)의 군집이 나타났는데, 특히 석조여래삼존상에 반해 보호각 외부에 위치한 석조여래입상에서 두드러지는 양상을 보였다.

4.2. 박리부 검출

청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 암석 표면에 존재하는 박리영역은 외부에 노출된 부분과 암석 내부 부분이 혼재하므로 육안으로는 정확한 영역을 분별

Figure 4. Deterioration form of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha. (A) Micro crack. (B) Structural crack. (C) Break-out. (D) Scaling. (E) Granularity decomposition. (F) Conservation material. (G) White discoloration. (H) Yellow discoloration. (I) Brown discoloration. (J) Black discoloration. (K) Lichen. (L) Algae.

하기 어려운 상황이다. 따라서 보다 신뢰할 수 있는 박리 영역을 검출하기 위해 적외선열화상 카메라로 촬영한 열화상 영상을 활용하였다. 이러한 적외선열화상 촬영은 비파괴·비접촉을 특징으로 하는 진단기술로, 기존에 건축물과 시설물 등에서 널리 사용되던 방법을 응용한 것이다. 열원으로는 전기히터를 사용하여 수 분 동안 열을 공급하는 능동적 방법을 활용하였으며 가온 후 자연냉각하면서 적외선열화상 카메라로 박리부를 촬영하였다.

적외선 열화상 촬영은 박리가 다수 발생한 석조여래삼존상의 전면과 후면을 대상으로 각각 4지점과 3지점에서 실시하였으며(Figure 5), 석조여래입상의 경우 박리가 거의 나타나지 않아 대상에서 제외하였다. 석조여래삼존상의 암석 표면을 적외선 열화상 카메라로 촬영한 결과, 열을 공급한 후의 표면 온도는 $27.2^{\circ}\text{C} \sim 100.4^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 나타났다.

박리영역의 온도분포를 확인하기 위해 Figure 8에서 촬영한 총 7지점의 열화상에 대하여 선행 열 분포를 분석한 결과, 박리가 발생되지 않은 영역에서는 $27.2^{\circ}\text{C} \sim 51.7^{\circ}\text{C}$ 의 온도분포를 나타내지만 박리가 발생한 영역에서는 온도가 급격하게 증가하여 $48^{\circ}\text{C} \sim 100.4^{\circ}\text{C}$ 의 온도분포를 보였다(Figure 5). 이렇듯 동일한 열을 공급하였음에도 박리영역의 온도가 높은 이유는 박리 내부의 빈 공간에 존재하는 공기층이 표면의 석재와 비열의 차를 가지기 때문으

로, 급격한 온도변화가 발생하는 지점을 박리영역으로 추정할 수 있다. 이러한 박리는 향후 박락으로 발전할 가능성이 크므로 향후 보존관리를 위하여 손상지도에 도시하였다.

4.3. 손상지도 작성 및 손상을 산출

청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 정밀한 현장조사를 통해 손상양상을 물리적 손상(Figure 6A~6D)과 화학적·생물학적 손상으로 분류한 손상지도를 작성하였다(Figure 6E~6H). 여기에 적외선열화상 영상을 이용해 가시화한 박리영역 분포도를 종합하여 디지털 손상지도를 완성하였다.

손상지도의 각 훼손유형 점유율은 색상분류에 적합한 이미지 분석 소프트웨어를 활용하여 전체 면적을 기준으로 한 정량적인 훼손율을 산출하였다(Table 2). 석조여래삼존상에서 두드러지게 나타나는 훼손유형은 균열, 탈락, 박리박락과 같은 물리적 풍화와, 황색·갈색·흑색변색의 화학적 풍화이다.

오랜 과거에 발생하였을 것으로 추정되는 탈락을 제외하면 모든 풍화양상이 후면에서 두드러지게 발생함이 확인되었다. 특히 석조여래삼존상 후면의 넓은 영역에서 관찰되는 박리(12.9%) 및 박락(9.3%)과 미세균열은 석조여

Figure 5. Scaling part using infrared thermal image in the Stone Seated Buddha Triad. Each thermal image numbers are shown in upper image.

래삼존상이 경험한 심각한 풍화이력을 지시한다. 또한 미세균열의 발생위치는 황색변색의 분포영역(50.5%)과 상당부 일치하는 것으로 나타났다. 이는 과거 석조여래삼존상이 발에 쓰러진 채로 발견되었다는 사실로 미루어봤을 때 토양과 오랜 시간 접촉한 후면부가 토양에 머무르는

수분, 토양 내의 유기물 및 무기물, 활발한 생물활동 등에 의하여 물리적 풍화와 화학적 풍화, 생물학적 풍화가 다른 면에 비해 급속히 진행되었을 가능성을 지시한다.

석조여래입상의 물리적 풍화 양상에서, 입상분해는 주로 전면(57.4%)에서 나타나는 반면 미세균열은 대부분 후

Table 2. Deterioration rate of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha

State	Stone Seated Buddha Triad		Stone Standing Buddha	
	Front	Back	Front	Back
Break-out (%)	18.1	9.3	12.4	-
Scaling (%)	0.1	12.9	-	-
Granularity decomposition (%)	-	-	57.4	13.6
Conservation material (%)	2.3	4.3	-	-
White discoloration (%)	0.7	-	-	-
Yellow discoloration (%)	7.6	50.5	2.2	27.1
Brown discoloration (%)	-	7.6	-	-
Black discoloration (%)	8.2	15.9	-	-
Green lichen (%)	-	-	1.0	0.1
Grey lichen (%)	6.5	-	4.4	-
Dark algae (%)	-	-	80.7	51.2

Figure 6. Deterioration map. (A~D) are physical deterioration and (E~F) are chemical and biological deterioration. (A, E) Front of the Stone Seated Buddha Triad. (B, F) Back of the Stone Seated Buddha Triads. (C, G) Front of the Stone Standing Buddha. (D, H) Back of the Stone Standing Buddha.

면에 두드러진다. 석조여래입상의 탈락은 12.4%로 전면에서만 관찰되며 대부분 좌측방향에 편중된 모습을 보인다. 석조여래입상의 전후 표면 대부분 영역은 지의류·조류와 같은 생물체에 의해 피복되어 있는데 이는 현재까지도 별도의 보호시설 없이 오랜 기간 야외에 노출되어 있었던

환경조건에서 기인한 것으로 판단된다.

4.4. 초음파 물성진단

초음파 속도법은 현장에서 휴대 및 측정이 간편하고

Figure 7. 2D contour map using ultrasonic velocity of the Stone Seated Buddha Triad and Stone Standing Buddha.

흔적도 남지 않아 석조문화재 물성의 비파괴 진단에 널리 사용되는 방법이다(Chun *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2012). 이 연구에서는 대상 문화재의 형태를 고려하여 초음파 탐촉자의 배열방법을 간접법하고 탐촉자 간의 거리는 15 cm로 설정했다. 또한 간접전달방법을 직접전달방법의 속도

로 보정하기 위한 보정계수는 석불상의 비정형적인 형태 특성에 따라 직접 산출하기 어려운 환경이었으므로 Lee *et al.*(2009)에 의해 보고된 화강암의 평균 보정계수인 1.5를 적용했다.

측정지점은 석조여래삼존상의 전면에서 93지점, 후면

에서 95지점을 측정하여 총 188지점의 초음파 속도를 획득했으며 석조여래입상의 경우 전면 26지점, 후면 30지점으로 총 56지점을 측정하였다. 각 석불상의 초음파 속도 분포를 파악하기 용이하도록 측정위치에 따른 속도를 색상화했으며 측정하지 않은 부분은 Kriging법에 의한 보간을 수행하여 최종적으로 2D 등고선도로 도시하였다 (Figure 7).

석조여래삼존상을 구성하고 있는 화강암의 초음파속도는 전면의 경우 552~2,988 m/s의 범위에 평균속도는 1,845 m/s이며, 후면의 경우는 560~2,492 m/s의 범위에 평균속도가 1,536 m/s로 이는 우리나라의 여러 지역에 분포하는 화강암들에서 측정된 직접전달방법 환산 초음파속도 평균치가 대체로 3,000~5,500 m/s 사이에 분포하는 것으로 보고된 것(National Research Institute of Cultural Heritage, 2012)을 고려하면 매우 낮은 저속도 범위이다. 석조여래삼존상의 초음파속도 분포 경향에서, 전면의 경우 중앙에 위치한 삼존불좌상의 머리 위와 우측 어깨 위로 발달한 균열에 의한 저속도대가 나타나며 후면의 경우는 상단의 박락 및 박리영역에서 수평방향으로 넓은 저속도대가 분포한다.

석조여래입상의 초음파속도는 전면 545~2,460 m/s(평균속도 1,307 m/s)이며, 후면 543~2,481 m/s(평균속도 1,519 m/s)로 석조여래삼존상보다 전면과 후면 모두 낮은 초음파 속도를 보였다. 석조여래입상에서는 전면이 후면에 비하여 상대적으로 더 낮은 초음파속도 분포를 보였으며 특히 불신의 우측방향이 전후면 모두에서 저속도대를 나타내는 편중성이 확인되었다. 이는 불신의 우측방향에서 미세균열이 집중적으로 분포할 뿐만 아니라 입상분해, 흑색조류가 함께 발생한 결과로 판단된다.

석조여래삼존상과 석조여래입상에서 측정된 초음파속도를 평균하면 각각 1,689 m/s와 1,421 m/s으로, 이는 5,000 m/s 이상을 신선(fresh) 등급으로 보는 Iliev(1966)의 기준에 의하면 completely weathered(완전풍화) 등급에 속하는 가장 심한 풍화 단계이다. 단, 석불상을 구성하는 원암의 초기 물성 자체가 낮은 암석학적 특성을 가졌을 가능성 또한 존재하므로 청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 정확한 풍화등급 산출을 위해서는 차후 석불상의 원산지에서 충분한 수량의 시료를 확보하여 추가적인 물성 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

5. 고찰 및 결론

청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 구성 암석은 세립질 내지 중립질의 전형적인 흑운모화강암으

로 석영, 알칼리장석, 미사장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성되어 있다. 두 석물의 전암대자율은 다소 차이를 보이지만 모두 $0.2(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 미만의 낮은 대자율 값에서 분포를 보여 동일한 기원의 암석으로 판단된다. 비중리 석조여래삼존상 구성암석의 기원을 밝히기 위해, 삼존상에서 수습한 암석과 인근 노두에서 채취한 암석에 대한 동질성 분석을 수행하였다. 그 결과, 양자 사이의 육안기재적 특징, 박편상에서의 광물의 조성 및 입도, 전암대자율, 지구화학적 특성이 매우 유사한 것으로 나타났다. 이는 비중리 석불상이 인근 기반암과 성인적으로 같은 종류의 암석으로 제작되었음을 지시한다. 다만 이를 근거할 고문헌 자료나 채석흔은 발견하지 못하였는데 석조여래삼존상의 규모를 고려하면 별도의 채취 과정 없이 노두에서 분리되어 존재하는 거대 암석을 다듬어 사용하였을 가능성도 존재한다.

청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 보존 현황 및 손상양상 조사 결과, 물리적·화학적·생물학적 요인에 의한 복합적인 훼손유형이 확인되었다. 물리적 손상의 경우, 석조여래삼존상과 석조여래입상 모두 전면에서는 탈락이, 후면에서는 균열과 박리박락이 우세하였다. 특히 석조여래입상에서는 입상분해가 넓게 발달하였는데 이는 야외에 위치한 환경적 특성에 기인한 것으로 판단되며 외부의 수분침투를 저감하기 위한 보존관리가 필요할 것으로 판단된다.

황색 및 갈색 변색은 석조여래삼존상의 후면 하단에서 집중적으로 발생하는데, 과거 언덕 위에 놓여져 있었던 삼존상의 상태로 인해 토양과 수분으로 인한 풍화 가속화로 Fe 성분이 침착된 것으로 판단된다. 따라서 풍화심도가 깊어 변색제거가 용이하지 않을 경우에는 원암을 손상하지 않는 범위에서 적절한 단계의 세정처리가 요구된다.

생물에 의한 피해는 석조여래삼존상의 경우 전면 상부에서 일부 지의류 군집이 관찰되었으며, 야외에 위치한 석조여래입상에서는 전후면에 걸쳐 대부분의 암석면이 지의류와 조류로 피복된 것으로 나타났다. 이들은 태양광에 의한 급격한 온도변화, 강우로 인한 수분침투와 함께 작용하여 석조여래입상 전면에 두드러진 입상분해를 발생시킨 요인으로 판단된다. 따라서 풍화속도 저감을 위해 필히 세정이 이루어져야 하며, 현재 잔디로 피복된 석조불상 주변 사이트 환경을 변경하여 생물손상을 미연에 방지하는 것이 권장된다.

석조여래삼존상과 석조여래입상의 물성 추정을 위한 초음파속도 측정 결과, 이들은 모두 완전 풍화된 상태(CW)의 풍화등급으로 판정되어 현저히 낮은 물성을 지시하였다. 석조여래삼존상(평균 1,689 m/s)과 석조여래입상

(평균 1,421 m/s)의 초음파속도는 일반적으로 보고된 화강암의 초음파속도에 비하여 매우 낮은 수준이므로 이를 고려한 적절한 보존처리가 필요하다. 단, 풍화로 인한 속도감소뿐만 아니라 풍화 전 원암의 속도가 일반적인 화강암에 비해 저속도 특성을 보일 가능성 또한 존재하므로 향후 원산지 암석의 보다 정밀한 물성연구가 요구된다.

보존환경의 측면에서 현재 비중리에는 석조여래삼존상에만 보호각이 설치되어 있으며 야외에 위치한 석조여래입상은 기상환경에 의한 자연적인 풍화에 노출되어 있다. 보호각은 석조여래삼존상 하나를 보호하기에도 규모가 다소 작고, 비행 조류의 침입을 저지할 별도의 시설이 없어 배설물에 의한 이차적인 손상이 발생하고 있다. 뿐만 아니라 사람과 장비의 출입이 가능한 별도의 통로가 부재하여 장기적인 보존을 위한 진단 및 보존처리, 모니터링에 불리한 환경이다. 이 밖에 석불 인근에 위치한 철가공소로 인한 소음과 냄새, 방문객 주차장의 부재, 포장되지 않은 관람로 등도 방문객들의 접근을 저해하는 요소로 향후 개선이 필요하다.

이 연구를 통해 밝혀진 청주 비중리 석조여래삼존상 및 석조여래입상의 재질 및 물성특성과 복합적 손상 현황 정보는 보존계획 수립을 위한 필수적인 기초자료들이다. 이들은 향후 비중리 석불상들의 장기적인 관리와 보존상태 모니터링, 추가 연구를 위한 중요한 근거로 제시될 것이다.

REFERENCES

Cheong, W.S., Kim, Y.S. and Na, K.C., 2011, SHRIMP zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic study of the Cheongju granitoid rocks. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 191-206. (in Korean and English abstract)

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

Chun, Y.G., Lee, C.H., Jo, S.N., Jo, Y.H., Park, G.J. and Yang, P.S., 2008, Measurement of Crack Depth and Weathering Degree Using Ultrasonic Velocity and Deterioration Evaluation of the Unhyungung Stone Water Container. *Journal of Conservation Science*, 24, 1-11. (in Korean and English abstract)

Iliev, I.G., 1966, An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. the First Congress of the International Societ of Rock Mechanics, Lisbon,

September 25-October 1, 109-114.

Jin, H.J., Kim, R.H., Yoon, J.H. and Lee, C.H., 2014, Investigation of provenance and characteristics for rock properties to the South Gate Wall of Myeoncheoneupseong Town Wall in Dangjin, Korea. *Journal of Conservation Science*, 30, 189-203. (in Korean and English abstract)

Kim, C., 2016, A study on the Stone Buddha Statues from Bijung-ri temple site, Cheongju: Focusing on country of origin. *Art History Association Of Korea*. 290-291, 5-42. (in Korean and English abstract)

Kim, J., Jo, Y.H. and Lee, C.H., 2013, Material and deterioration characteristic analysis for stone sculptures in Gyeongbokgung royal palace, Seoul. *Journal of Conservation Science*, 29, 407-420. (in Korean and English abstract)

KNUE Educational Museum, 1991, Archaeological field survey and brief report of excavation on the Stone Buddha in Cheongwon-gun Bugil-myeon Bijoong-ri. Cheongwon-gun, 1-13. (in Korean)

Lee, C.H. and Kim, J.H., 1971, Geologic map of Jeungpyeong Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 1-16. (in Korean and 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 and English abstract)

Lee, C.H., Shin, H.C. and Han, D.R., 2017, Ultrasonic properties on building stones, characteristics of structural deformation and conservation states of the sanctuary in Wat Phou Temple of Champasak, Lao PDR. *Journal of Conservation Science*, 33, 399-416. (in Korean and English abstract)

Middlemost, E.A., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37, 215-224.

Moon, M., 1982, On the Three-kingdom Period stone buddha image unearthed at Chungwon Bijoong-ri. *Bulgyohakbo*, 19, 257-274. (in Korean)

National Research Institute of Cultural Heritage, 2012, Nondestructive evaluation of weathering degree for stone cultural heritage using ultrasonic test. National Research Institute of Cultural Heritage, 1-19. (in Korean)

Nockolds, S.R., 1954, Average chemical compositions of some igneous rocks. *Geological Society of American Bulletin*, 65, 1007-1032.

Park, J.H., Lee, C.H. and Choi, G.E., 2017, Characteristics of surface deterioration and materials for stone guardian and stone memorial tablets from Muryeong Royal Tomb of Baekje Kingdom in ancient Korea. *Journal of*

- Conservation Science, 33, 241-254. (in Korean and English abstract)
- Pearce, J.A., 1983, Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth, C.J. and Norry, M.J. (eds.), Continental Basalts and Mantle Xenolith, Shiva, 230-249.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312.
- Yi, J.E., Lee, C.H. and Lee, M.S., 2006, Deterioration assessment and conservational scientific diagnosis of the Stone Pagoda in the Bunhwangsa temple, Gyeongju, Korea. Journal of Conservation Science, 18, 19-32. (in Korean and English abstract)