구리 현릉 능상석물의 표면 손상특성 평가

오정현 | 김사덕 | 이찬희*¹ | 이태종

국립문화재연구소 문화재보존과학센터, *공주대학교 문화재보존과학과

Characterization of Surface Deterioration for Stone Property around the Hyeonleung (Royal Tomb of Joseon Dynasty) in Guri, Korea

Jeong Hyun Oh | Sa Dug Kim | Chan Hee Lee*¹ | Tae Jong Lee

Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Deajeon, 34122, Korea

*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 32588, Korea

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

초록 구리 현릉의 능상석조물은 주로 자철석계열의 흑운모화강암으로 구성되었으며 풍화도가 높다. 손상 특성으로는 미생물 및 토사 유입과 흑색오염물의 발생률이 높게 나타났다. 봉분 부재에 대한 손상도 평가 결과, 토사(50.5%)와 지의류(47.6%)의 피도가 주요 요인으로 나타났으며 북면에서 지의류 외의 생물생육(8.6%)이 두드러진다. 표면오염물은 광물산화와 부재간 이음부에서 석고가 생성되었고 주요 변색양상인 흑색은 유기물에 의한 것으로 해석되었다. 각 단위 부재별 초음파 측정 결과, 평균 2,195 m/s의 속도로 심한풍화(HW)가 진행된 상태이며 대부분 부재에서 4~5등급에 도시되었다. 따라서 현릉의 능상석물에 대한 보존처리가 필요한 상태로 판단된다. 훼손을 촉진하는 토사 및 높은 점유율을 보이는 지의류 등 생물오염 세척과 상당한 풍화가 진행된 부재에 대한 강화 및 집합·충전이 요구된다. 또한 Ca를 주성분으로 하는 보수물질과 백화에 대한 제거 및 재처리 여부에 대한 논의가 필요하다.

중심어: 조선왕릉, 현릉, 석조물, 손상상태, 보존처리

ABSTRACT The materials of sculptured stone property around the Hyeonleung Royal Tomb in Guri consist mainly of high weathered of granitic rocks with magnetite-series. Deterioration characteristics occurred highly with microorganism, soil inflow and black contaminants at the burial mound zone. As a result of deterioration evaluation, stone surface around the burial mound zone show serious comprehensive damage of soil inflow (50.5%) and lichen coverage (47.6%) which are the major damaging factors, and there are about 8.6% of biological growth noticeably in the north side. Surface contaminants and the discoloration had the complex causes. Gypsum occurred between joints of stones and the major contaminant type, darkening which was analyzed organic bodies caused discoloration. From result of ultrasonic velocity measurements, there are mean value of 2,195 m/s with highly weathered (HW) grade. Most of the stone properties showed 4 to 5 weathered grade. Therefore, it turned out that sculpture stone properties require conservation treatments. To remove soil accelerating damage factors and lichen occupying high percents, the cleaning process is necessary and consolidation, rejoining and filling are needed as well. Also, consideration on removing conservation materials containing Ca and efflorescence is required and retreatments need to be considered.

Key Words: Royal tomb of Joseon dynasty, Hyeonleung, Stone property, Deterioration state, Conservation treatment

1. 서론

조선은 27대 왕조를 이어오는 동안 42기의 왕릉을 조성하였으며 2009년 유네스코 세계문화유산으로 지정되었다. 조선왕릉의 능역은 일제강점기를 거치며 대폭 축소되었으나 능상의 석조물은 대부분 원형을 유지하고 있다(Jo, 2009). 특히 현릉은 국조오례의(國朝五禮儀)를 충실히 따른 가장 오래된 왕릉으로서 그 가치가 높게 평가되고 있으며 조선왕릉을 대표하는 능으로 원형보존의 필요성이 매우 크다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011). 현릉은 조선의 제5대 왕인 문종과 현덕왕후의 능으로 경기도 구리시 인창동에 있는 동구릉 내에 동원이강릉(同原異岡陵)으로 조성되어 있다(Figure 1A, 1B).

문종왕릉은 1452년에 장사하였고 왕비릉은 안산에 소릉(1441년)으로 조성하였다가 1513년 현 위치로 천장하였다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011). 왕릉 능상공간의 석조물은 자연환경에 노출되어 지속적인 손상이 진행되어 왔으나 보존과학적 연구는 거의 없었다. 왕릉을 구성하는 석조물의 방대한 수량과 왕릉이 가지고 있는 엄숙하고 신성시되는 공간으로서의 고정관념으로 인해 그동안 체계적인 조사와 연구가 제약을 받아왔기 때문이다.

그러나 세계문화유산 지정과 함께 조선왕릉에 대한 국민적 관심도가 높아지고 왕릉 내 석조물의 손상 가속화로 인한 보존대책이 대두됨에 따라 각 석조물의 손상양상 파

악과 보존방안의 수립이 요구되고 있다. 따라서 이 연구는 현릉의 단위부재별로 다양한 조사와 분석기법을 활용한 정밀진단을 실시하였으며 이 결과를 통해 조선왕릉 능상 석조물의 원형보존에 필요한 보존과학적 자료구축과 보존방안 수립을 위한 기초자료로 활용되길 기대한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

현릉은 동원이강릉으로서 두 개의 능침공간이 존재하고 있다. 이 연구에서는 문종과 현덕왕후의 능 중 향좌측 언덕에 조성된 문종릉(이하 현릉)의 능상석조물을 대상으로 하였다. 일반적인 조선왕릉의 능상 공간은 상계(上階), 중계(中階), 하계(下階)로 나누고 그 구역에 따라 석물이 배치되는데 문종릉도 이와 같다. 능상공간의 전체 부재는 195개로 하계에 4기, 중계에 5기, 상계에 15기, 봉분에는 봉토를 지탱하는 171개의 단위부재로 이루어져 있다(Figure 2).

가장 하단인 하계에는 무석인과 석마가 양쪽으로 한기씩 있고 중계에는 문석인과 석마가 동일한 구도로 배치되며 중앙에는 장명등이 위치한다. 무석인과 문석인은 높이 약 3 m, 폭 약 1 m로 거구이며 후측면에 석마가 한기씩 있다. 중계의 장명등은 팔각형의 옥개석과 신석이 따로 제작

Figure 1. Location map. (A) Hyeonleung royal tomb in Guri, (B) Sky view.

되어 2개의 부재로 구성된다. 상계에는 봉분 정면으로 4매의 축석이 반치고 있는 상석과 좌우로 기단부와 기둥석이 결합된 망주석이 분포하며 봉분 둘레로 각 4기의 석양과 석호가 교호하여 배치되었으며 지름 약 10 m, 높이 약 5.8 m의 봉분이 조성되어 있다(Figure 2A).

봉분부는 수직부재와 수평부재로 나눌 수 있으며 이들이 결구되어 봉분의 토압을 지탱한다. 봉분은 인석, 만석, 병풍석, 우석, 정지대석의 순서로 수직적 결구를 이루고 있으며 난간석, 난간석주, 동자석주로 이루어진 난간부가 봉분을 감싸며 그 사이에는 박석과 지대석이 분포한다. 이들은 십이지를 상징하는 12개의 면을 형성하며 대부분 한 면당 하나의 부재가 존재하나 난간석과 지대석은 2매씩 24기, 박석은 3매씩 36기로 결구되었다(Figure 2B). 서북면에는 인석을 지지하는 3매의 석주가 있는데 이는 구조적 문제점이 발생하여 후대에 설치되었던 것으로 판단된다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 손상도가 높은 현릉 능상석조물에 대한 정밀진단을 수행하였다. 먼저 전체 단위부재별로 주요 손상양상을 조사하였으며 구성암석의 재질특성을 파악하기

위해 전암대자율을 측정하였다. 여기에 이용된 계측기는 ZH Instruments사의 SM30 모델이며 단위는 $\times 10^{-3}$ SI unit로 표기하였다. 미량의 박락면을 수습하여 석재의 현미경 관찰을 실시하였다. 기기는 자동계수기가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용현미경이다. 또한 PANalytical사의 EMPYREAN로 X-선 회절분석을 수행하여 구성광물의 조성과 보수물질의 조성을 동정하였다.

능상석조물의 손상도 평가를 위해 손상도면과 표면오염물 분석을 수행하였고 초음파 측정을 통해 물성을 파악하였다. 표면오염물 분석은 Innov-X System사의 P-XRF Alpha-4000을 이용하였으며 EDAX사의 Eagle 3-XXL 모델의 Micro-XRF 분석과 JEOL사의 JSM-5910LV에 Oxford사의 Oxford 7324를 장착한 SEM-EDS분석을 실시하였다.

손상도면 작성방법은 실측도면에 현장 정밀관찰을 통한 기록을 실시하고 고해상도 사진을 도면과 합성한 후 현장기록을 참고하여 제작하였다(Inkpen *et al.*, 2001; Jo and Lee, 2011). 도면제작에 사용된 프로그램은 Adobe Illustrator와 Photoshop을 이용하였고 점유율 산정을 위해 Auto CAD를 사용하였다.

또한 초음파 측정에 사용된 기기는 Proseq사의 Pundit Lab과 54 khz의 탐촉자를 사용하였다. 측정방법은 봉분부

Figure 2. Plot plan of Hyeonleung. (A) Plot plan of surrounding stone property, (B) Plot plan of burial mound stone property.

재의 경우 각 부재별의 크기를 고려하여 3~10회 측정하였고 주변석물은 양측면에서 각각 5회 측정하였다. 측정거리는 15 cm로 이동에 따른 오차를 줄이기 위해 탐촉자 고정장치를 활용하였다.

3. 손상상태 및 평가

3.1. 재질 특성

현릉 석조물은 주로 흑운모화강암으로 석영과 장석 및 흑운모가 조암광물을 이루며 부재에 따라 중립질 내지 조립질의 조직을 보인다. 이들의 미세자극적 특성을 파악하기 위해 전암대자율 측정을 실시하였다. 전암대자율은 석재의 동질성 규명과 산지를 추정하는 기초자료로 널리 활용되고 있다(Jwa *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2011). 측정결과, 2.18~8.41(평균 5.40×10^{-3} SI unit) 범위로 나타났다(Figure 3A).

주변의 석물입상과 봉분 부재의 평균값을 구분하면 봉분 부재는 총 513지점에서 $5.36(\times 10^{-3}$ SI unit), 주변석물에서는 총 72지점에서 $5.69(\times 10^{-3}$ SI unit)의 평균값으로 거의 같은 값을 보인다. 또한 후대에 설치된 것으로 보이는

서북면 3개의 기둥석 평균값도 $6.48(\times 10^{-3}$ SI unit)로 측정되어 모든 부재가 자철석 계열의 유사한 값을 보였다(Ishihara, 1998). 따라서 현릉의 구성 부재들은 암석학적으로 아주 유사한 진화과정을 거친 화강암인 것으로 판단된다.

또한 구성광물의 특징을 살펴보기 위해 미량의 박락편을 수습하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 수습된 시편은 높은 풍화도를 보이고 물성이 약화된 상태였으며 석영입자 내부에 미세균열이 관찰되었다. 또한 입자별 경계에서 확장된 균열을 보인다. 장석의 입자내부에서는 견운모화가 진행되었고 흑운모는 변질 받아 녹니석화가 진행 중인 것으로 나타났다(Figure 3B). 따라서 현릉의 구성부재는 상당한 풍화가 진행되는 것으로 해석된다. X-선 회절분석 결과에서도 흑운모화강암의 주구성광물인 석영, 알카리 장석, 사장석, 흑운모 등이 검출되었다(Figure 3C).

3.2. 오염물 분석

3.2.1. 표면분석

현릉 석조물에 나타나는 화학적 오염원을 살펴보기 위해 P-XRF를 활용한 비파괴 분석을 수행하였다. 분석대상

Figure 3. Magnetic susceptibility and mineralogical characteristics of stone property in Hyeonleung. (A) Magnetic susceptibility of the whole stone, (B) Microphotographs showing rock-forming minerals, (C) X-ray diffraction pattern of host rock.

Table 1. Concentrations (ppm) of fresh and contaminated area by P-XRF analysis.

Element	Type	Max	Min	Mean	Type	Max	Min	Mean
S	Fresh (7 point)	<LOD	<LOD	<LOD	Yellow (8 point)	504,498	<LOD	202,738
Cl		<LOD	<LOD	<LOD		<LOD	<LOD	<LOD
K		46,854	9,381	31,686		83,875	5,680	33,858
Ca		35,066	5,401	15,005		626,678	8,617	146,484
Mn		377	139	263		815	89	410
Fe		7,465	3,218	4,882		64,335	2,222	16,485
S	Black (16 point)	9,539	<LOD	596	Soil (2 point)	<LOD	<LOD	<LOD
Cl		<LOD	<LOD	<LOD		<LOD	<LOD	<LOD
K		80,103	9,784	35,956		57,031	48,807	52,919
Ca		423,103	10,646	42,540		17,535	16,891	17,213
Mn		1,494	180	491		279	264	272
Fe		13,064	4,877	8,442		8,704	5,405	7,055
S	Brown (2 point)	<LOD	<LOD	<LOD	Conservation Material (4 point)	<LOD	<LOD	<LOD
Cl		<LOD	<LOD	<LOD		12,894	<LOD	3,246
K		38,849	30,577	34,713		92,511	7,807	34,298
Ca		12,173	9,425	10,799		631,193	245,466	339,947
Mn		534	198	366		398	236	304
Fe		40,726	5,187	22,957		30,387	3,567	14,509

은 여러 가지 오염현상을 관찰할 수 있는 봉분 부재를 선정하였으며 12면에서 주로 나타난 흑색, 황색, 갈색, 토사, 보수물질 등과 대조군인 신선한 영역을 구분하여 측정하였다(Table 1). 신선한 영역은 7지점에서 측정하였으며 주요 변색요인인 Fe와 Mn은 각각 4,882 ppm과 263 ppm의 낮은 평균값을 보였다. Ca은 5,401~10,696 ppm의 범위를 보였지만 일부지점에서 35,066 ppm의 비교적 높은 함량으로 검출되었다.

흑색 변색은 현릉 석물에서 나타나는 대표적인 오염으로 육안 및 휴대용 현미경 관찰 결과, 지의류 및 조류 등의 생물오염원의 고사체로 판단된다. 광물산화에 의한 변색은 보통 Mn과 Fe에 의해 발생되지만 각각 평균 490 ppm과 8,386 ppm으로 신선부 대비 변색정도에 비해 낮게 검출되었다. 일부 지점에서는 높은 Ca값이 나타나 보수물질 및 석고의 생성이 예상되나 대부분의 흑색 변색은 유기물에 의한 오염 가능성이 높을 것으로 해석된다.

갈색 변색 지점에서는 Fe의 함량이 비교적 높게 나타났으나 토사 측정 결과와 비슷한 값을 보였다. 황색 변색의 원인은 세 가지로 요약되었다. 주요 변색원인인 Fe가 평균

15,480 ppm 이상이 측정되었으나, 일부 지점에서는 평균 6,214 ppm으로 신선부 대비 낮은 값을 보였다. 그러나 일부 지점에서는 S(14,527~504,498 ppm)과 Ca(94,480~626,678 ppm)이 높게 나타나 석고생성의 가능성이 높다. 또한 다른 지점에서는 토사와 비슷한 값을 보여 표면미자 사이에 토사미분이 함착되어 색변화를 일으킨 것으로 판단된다.

3.2.2. 미세분석

흑색오염물은 현릉 능상석조물에서 가장 높은 발생률과 피복도를 보인다. 주로 검은색 지의류 및 조류와 이끼류가 관찰되었다. 또한 광물산화와 기타 유기물에 의한 오염이 확인되었다(Figure 4A, 4C). 광물산화와 유기물 오염부분은 현장에서 P-XRF 분석을 실시하였으나 유실된 봉분 토양에 의한 교란으로 정확한 결과를 얻을 수 없어 Micro-XRF와 SEM-EDS를 이용한 추가분석을 수행하였다(Figure 4).

시료는 물리적 손상이 높은 석물주변에 산재한 미량의 박편을 수습하였고 세척을 통해 교란인자를 제거한 후 분석하였다. 높은 투과성을 가지는 X-선 분석은 원암과 오

Figure 4. Surface black contaminants and discoloration factor analysis of stone property in Hyeonleung. (A) Appearance of black oxidation, (B) Micro-XRF analysis for mineral oxidation, (C) Appearance of micro organic species, (D) Micro-XRF analysis for organic species, (E) SEM-EDS analysis for organic species.

염물에서 검출되는 오염원소와 구분하기 쉽지 않다. Micro-XRF는 시료의 오염부와 신선부를 동시에 분석하여 오염 원소를 쉽게 검출할 수 있다. 분석결과, 광물산화 오염에 해당하는 시료에서 신선부는 Mn이 0.05 wt.%, Fe는 0.5 wt.%의 함량이, 흑색오염부에서는 Mn이 0.36 wt.%, Fe가 12.24 wt.%로 검출되었다. 이들의 함량비는 Mn이 7.2배, Fe는 24.5배의 증가율을 보여주어 주로 Fe에 의한 변색으로 추정된다(Figure 4A, 4B).

유기오염물 시료는 신선부에서 Mn이 0.37 wt.%, Fe는 25.27 wt.%, 흑색오염부에서 Mn이 0.64 wt.%, Fe는 35.01 wt.%가 검출되었다. 이들은 각각 Mn이 1.7배, Fe에서 1.4배의 비율을 보여주는데 변색정도에 비해 낮은 함량비를 갖는 것이다(Figure 4C, 4D). 따라서 추가보완을 위해 SEM-EDS 분석을 실시하였다. 이를 이용하여 미세조직과 산출상태를 살펴본 결과, Mn과 Fe는 거의 검출되지 않았고 C의 함량이 43~50 wt.% 가량으로 나타났으며 조직의 모양을 고려했을 때 하등생물의 고사체 의한 오염으로 추정된다(Figure 4E).

3.2.3. 보수물질 분석

보수물질은 능상석물의 결구부나 이음을 보강하기 위해 주로 쓰였다. 이들은 대부분 상당한 풍화가 진행되어 본래의 기능을 상실하였다. 과거 보수물질은 높은 Ca 등의 함량으로 석조문화재의 표면손상에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 보수재료 및 방법을 알아보기 위해 탈락된 편을 일부 수습하여 X-선 회절분석을 실시하였다.

육안관찰 결과, 보수물질은 세 가지 유형으로 나타났다(Figure 5A). ①유형은 주로 난간석 등 이음부에서 주로 나타났다, ②유형은 병풍부와 난간부에서 혼용되었다. ③유형은 병풍석과 우석에서만 나타났고 백색 또는 황백색을 띤다. 이중 ①과 ②유형은 표면오염 및 풍화로 인해 육안상 구분이 불분명하였고 ③유형은 일정 부분에서 피각층으로 나타났다.

X-선 회절분석 결과, ①과 ②시료에서는 충전제로 모래 또는 석분을 혼합한 것으로 판단된다. ①시료는 바인더 물질인 Ca의 함량이 미량 검출되어 오랜 기간 풍화로 인해 용해되었거나 배합방법의 차이로 해석되어 처리에 시기적 차이가 있는 것으로 추정된다. ③시료는 Ca를 주성분으로 한 바인더를 사용했음을 알 수 있는데 미량의 석영은 시료 표면에 부착되었던 것으로 판단된다(Figure 5B). 한편 일성록에 기록된 현릉의 보수기록을 살펴보면 회칠은 조선시대 보수방법의 한가지로 파악되었다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011).

3.3. 종합 손상특성

석조문화재에 적용하는 조사는 이미 다양한 과학적인 방법들이 활용되고 있다. 이중 육안관찰에 의존하는 현장기록표를 이용한 현장조사는 짧은시간에 보존상태를 체크할 수 있는 기초적인 방법이다. 이는 과학적 기기를 이용한 방법과 달리 표면관찰에 한정되어 있고 미시적 및 정량적 평가를 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 그러나

Figure 5. Occurrences of former conservation materials (A) and analytical result of X-ray diffraction patterns for former conservation materials (B).

Figure 6. Representative deterioration map of Byeongpung zone stone properties in burial mound of Hyeonleung.

Table 2. Summary of deterioration rate (%) by area of stone property in Hyeonleung.

Classification	Physical Weathering					Surface Discoloration					Biological Pollution			
	Cr	Ex	Bo	Gd	Cm	Wh	Bl	Br	Ye	So	Al	Li	Mo	Pl
Burial Mound Stone property	19.3	84.8	42.7	83.6	62.0	9.9	18.7	7.0	24.0	70.2	2.3	98.8	73.1	59.6
Surrounding Stone property	4.2	91.7	8.3	33.3	25.0	8.3	45.8	66.7	8.3	0	91.7	83.3	37.5	0

Cr; Crack, Ex; Exfoliation, Bo; Break out, Gd; Granular disintegration, Cm; Conservative material, Wh; White, Bl; Black, Br; Brown, Ye; Yellow, So; Soil, Al; Algae, Li; Lichen, Mo; Moss, Pl; Plant.

기록표를 이용한 조사연구는 과거 석조문화재보존관리연구 등 전반적인 석조문화재의 현장조사에서 기초자료로써 축적되어 왔고 보존관리에 활용되었다.

현릉 능상석조물은 195개의 단위부재로 구성되어 있으며 전체적인 손상양상에 대한 파악이 요구되었고 기존의 조사방법을 개량하여 객관화된 체크리스트형 조사표를 고안하였다. 이러한 체크리스트형 조사방법은 주요 손상양상을 빠르게 파악하고 분석결과 제기된 문제점에 정밀한 진단과 보존방안 수립을 위한 선행연구 자료로 활용할 수 있는 장점이 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2014).

손상유형은 크게 물리적, 화학적, 생물학적 요인으로 구분하였으며 각 요인에 따라 전체 부재에 대한 손상 발생률을 분석하였다(Table 2). 대부분의 석조물에서는 입상분해와 박리박락 등이 진행되고 있었으며 특히 봉분부재에서 물리적 손상이 높게 발생하였다. 봉분부재는 주변석물 입상과 달리 구조적 특성으로 인해 균열, 탈락, 보수물질 열화 등이 높게 발생하였다.

또한 주변석물에서는 흑색과 갈색 변색이 높게 발생한 반면 봉분부재에서는 황색과 토양에 의한 변색의 발생률이 높게 나타났다. 생물오염은 조류 외 지의류, 선태류, 초본식물 등이 봉분부재에서 주로 발생하였으나 조류는 주변석물에서 높은 발생률을 보인다. 봉분부재의 높은 생물오염도는 구조적인 요인과 함께 봉토에서 유실된 토양, 침착된 먼지, 정제된 수분 등의 영향에 따른 것으로 판단된다.

3.4. 표면 손상도 평가

단위부재의 손상특성 분석결과, 봉분에서 전체적으로 높은 풍화도를 보이며 여러 가지 요인들이 복합적으로 나타나는 것을 확인하였다. 또한 일부 부재에서 높은 물리적 손상을 보이며 향후 지속적인 손상가능성을 야기하고 있

다. 따라서 수직적 구조를 가지는 봉분부재를 대상으로 손상도를 정량적으로 평가하고 추후 손상의 진행을 검토하기 위해 손상도면을 작성하였다(Figure 6).

이와 같은 연구기법은 국내외적으로 활발히 응용되고 있다(Fitzner and Heinrichs, 2002; Lee *et al.*, 2003; Jo *et al.*, 2010; Chun and Lee, 2012). 손상지도는 육안으로 관찰되는 박리박락, 입상분해, 보수물질, 탈락, 조류, 지의류, 선태류, 초본식물, 토사, 백색, 황색 등 각 요인별로 분류하고 방위에 따라 12면을 실측도면에 적용하였다. 현장에서 작성된 실측도면상의 조사내용과 고해상도 사진을 병합하여 손상범위를 정밀하게 도시하였다(Figure 6).

손상도 정량평가 결과, 물리적 손상은 주로 입상분해(0.6~13.5%)와 박리박락(0.6~12.0%)이 나타났고 남면 대비 북면에서 현저히 줄어든 점유율을 보여준다. 입상분해의 경우 남면에서 9.3%, 북면에서 0.9%로 현저하게 낮지만 W-1면의 인석에서는 100%의 점유율로 산출되었다. 박리박락은 남면 6.5% 대비 북면 2.4%의 점유율 차이를 보여주었으며 주로 정지대석에서 높은 손상도가 나타났다. 부분적으로 과거에 처리되었던 시멘트모르타르(0~1.7%)는 균열, 탈락 등 상당한 풍화가 진행되었고 일부 부재의 탈락부는 보존처리가 필요할 것으로 판단된다.

변색은 백색(0~2.6%)과 황색(0~16.2%)이 관찰되었으며 수직적 분포를 보인다. 백색변색은 E-1면의 병풍석에서 가장 넓은 범위에 나타났고 일부 구간에서 황색과 교란되어 있다. 황색변색은 S-1면(16.2%)의 병풍석과 우석에서 특히 두드러졌는데 대부분 얇은 피각을 이루는 것으로 관찰되었다.

토사와 지의류의 피도는 가장 넓은 범위에서 나타났다. 토사피복의 경우 대부분의 부재에서 34.6~70.2%의 범위에서 높게 나타났고 북면(61.1%)에서 두드러지게 관찰되었다. 지의류는 33.9~60.9%의 높은 점유율로 남·동·서면(50.6~52.4%)에서 비교적 높은 피도를 보여주었다. 또한

북면에서는 선태류(4.1~10.3%) 및 초본식물(0.4~1.1%)의 점유율로 비교적 높게 산출되었는데 이들은 대부분 토사에 생육하는 양상을 보였다. 이처럼 토사는 생물 생육에 영향을 주고 있으며 두껍고 넓은 피복율로 인해 물리적 손상 및 변색 등이 관찰되지 않았을 가능성이 있다.

3.5. 초음파 물성평가

초음파는 매질의 물성과 상태에 따른 전달속도의 차이를 이용한 것으로 비파괴 진단 중 암석의 물성을 측정하는 대표적인 방법이다. 측정방법은 석조문화재에서 주로 활용하고 있는 간접전달 방법으로 실시하였다. 간접전달 방식은 초음파의 지향성이 직접전달 방식에 비해 상대적으

로 떨어지므로 낮은 값을 보이는 경향이 있기 때문에 직접 전달 방법의 속도로 보정해주어야 한다(Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012). 대부분의 현릉 석조물은 간접적인 측정 조건이었으나 죽석부재에서 직접전달 방식의 측정이 가능하였다. 따라서 동일지점에 대해 직접전달 방식과 간접전달 방식으로 측정하여 보정계수 1.6을 얻었다. 이를 적용하여 전체부재의 간접전달 값을 보정하여 산출하였다.

각 부재들에 대한 초음파 측정결과, 1,216~3,776 m/s의 속도를 보이며 평균값은 2,195 m/s로 나타났다. 주변석물의 경우 1,296~3,053 m/s의 범위에서 2,356 m/s의 평균값을 보이고 봉분 부재는 1,216~3,776 m/s의 속도대와 평균값은 2,154 m/s로 산출되어 심한풍화(HW) 이상의 부재가 대부분으로 나타났다(Table 3).

Table 3. Summary on ultrasonic velocity measurement of stone property in Hyeonleung.

		Ultrasonic velocity (m/s)			
	Surrounding stone property	Burial mound stone property			
		South side	West side	North side	East side
Min	1,434	1,573	1,280	1,436	1,372
Max	2,759	3,563	3,275	2,830	3,074
Mean	2,356	2,173	2,190	2,255	1,999

Figure 7. 2D contour maps showing ultrasonic velocity of stone property in Hyeonleung. (A) Map of surrounding stone property, (B) Map of burial mound stone property.

이 결과를 바탕으로 풍화지수를 산출하고 도시하였다 (Figure 7). 풍화지수는 동종의 신선한 암석과 풍화된 암석의 상대적인 초음파 값을 대비한 것으로 0~1.0의 값 범위에서 산출되며 높은 값을 보일수록 풍화도가 높다. 신선한 암석은 전암대자율, 구성암석의 입도, 거리 등을 고려했을 때 산지의 가능성이 유력한 포천화강암을 선정하였으며 그 값은 3,665 m/s를 적용하였다(Jo and Lee, 2011). 풍화지수는 전체부재에서 0.03(SW)~0.65(CW)의 값을 보이며 평균값은 0.45(HW)로 나타났다.

이에 따른 분포도를 살펴보면 북·동면에서 높은 풍화도가 나타났다. 봉분부재는 중간풍화(MW)가 90기, 심한풍화(HW)는 61기로 높게 나타났고 그 외 완전풍화(CW)가 수평적 부재 일부(7기)에서 보였으며 나머지 13기의 부재는 약한풍화(SW)로 산출되었다. 전체적으로 북면의 부재들의 풍화도가 높게 나타났고 특히 인석, 지대석, 박석, 난간부재의 낮은 물성분포를 보였다(Figure 7B).

주변 석물입상은 서면의 석물을 중심으로 7기에서 중간풍화(MW)가 되었고 동면의 석물을 중심으로 11기의 심한풍화(HW)가 나타났다. 또한 서면의 석양과 석마가 심한풍화(CW)로 나타났고 측정요건상 제외되었던 족석은 정밀 관찰과 비교결과, 심한풍화(HW) 이상의 풍화도를 보일 가능성이 높다(Figure 7A).

4. 고찰 및 결론

현릉 능상석물은 평균 $5.40(\times 10^{-3}$ SI unit)의 대자율을 갖는 자철석계열의 흑운모화강암으로서 구성입자의 변질과 입자간 미세균열 및 균열확장이 관찰되어 상당한 풍화가 진행되는 것으로 나타났다. 초음파 측정에서도 평균 2,195 m/s로 상당한 풍화(HW)가 진행된 상태로 나타났고 대부분의 부재에서 4~5등급의 풍화도로 도시되었다. 주로 난간부재(2,083 m/s)와 주변석조물(1,999 m/s)에서 높은 풍화도를 보였으며 병풍부재(2,571 m/s)에서 비교적 높은 초음파속도를 나타냈다.

물리적, 화학적, 생물학적 손상을 구분하여 요인별 발생률을 분석한 결과, 전체 부재에서 생물오염이 높은 것으로 나타났고 봉분 부재에서 생물오염, 토사피복 및 변색, 물리적 손상이 높게 발생하였다. 봉분부재중 종합적인 손상을 관찰할 수 있는 병풍부재의 정량적 손상평가 결과, 주로 지의류(47.6%) 및 선태류(6.0%) 등의 생물오염과 토사(50.5%)로 인한 표면오염이 주요 손상으로 분석되었다. 또한 높은 입상분해 및 박리박락의 발생률과 달리 점유면적은 각

각 4.1%, 5.4%로 부재의 일정 부분에서 소규모로 발생하는 것으로 나타났다.

현릉 석조물에서 나타나는 표면변색의 P-XRF, Micro-XRF, SEM-EDS 분석결과, 광물산화와 유기물에 의한 오염으로 나타났고 주로 관찰되는 흑색오염물은 생물의 고사체나 유기물 흡착에 의한 오염 가능성이 높은 것으로 판단되었다. 과거 보수물질은 변색, 염 등을 산출시키는 Ca가 주성분으로 분석되었고 주변표면에서 백화, 석고가 생성되어 지속적인 손상요인의 제어와 관리가 필한 것으로 나타났다. 또한 풍화도가 높은 석조물을 대상으로 강화 및 접합·충전 처리가 필요할 것으로 판단되며 높은 접착강도를 필요로 하지 않기 때문에 처리방법 및 재료 선정에 신중한 고려가 필요하다.

현릉의 능상공간은 사초(莎草)가 식재되어 있고 주변 5 m 이내에 수목이 존재한다. 이는 수분을 쉽게 증발시키지 못하게 하여 석조물의 높은 생물피도와 함께 물리적 손상을 가중시키는 것으로 판단된다. 왕릉의 상징적 관념을 고려하면 일반적인 정비나 보존관리는 어려울 것으로 예상되나 부분적인 토질변경이나 사초제거를 통해 수분의 유지시간을 최대한 단축시킬 필요성이 있다. 특히 봉분의 수분침투 및 잔류가 봉분부재에 미치는 영향과 봉분도양의 지속적인 유실과 제어에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Chun, Y.G. and Lee, C.H., 2012, Nondestructive deterioration diagnosis for the former ore dressing plant in the Yongwha mine of registered cultural property No. 255. *Journal of Conservation Science*, 28(3), 234-245. (in Korean with English abstract)
- Fitzner, B. and Heinrichs, K., 2002, 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, 11-56.
- Inkpen, R.J., Fontana, D. and Collier, P., 2001, Mapping decay : Integrating scale of weathering within a GIS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 885-900.
- Ishihara, S., 1998, Granitoid series and mineralization in the

- circum-pacific phanerozoic granitic belts. Resource Geology, 48, 219-224.
- Jo, J.H., Choi, J.H., Lee, C.H., Jo, Y.H. and Chun, Y.G., 2010, Precisely nondestructive diagnosis and slope stability of the Bonghwa Bukjiri Maaeyeoraejwasang (Rock-carved seated Buddha statue), Korea. Journal of Conservation Science, 26(2), 121-132. (in Korean with English abstract)
- Jo, W.Y., 2009, A study on the restoration of Joseon dynasty royal tombs sites, Korea. 1-4. (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(3), 251-260. (in Korean with English abstract)
- Jwa, Y.J., Lee, S.W., Kim, J.S. and Son, D.W., 2000, Source area of stones used for the stone buildings of Bulguksa temple and Seokguram grotto. Journal of the Geological Society of Korea, 144, 335-340. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Choi, S.W. and Suh, M.C., 2003, Natural deterioration and conservation treatment for granite standing Buddha of Daejosa temple, Republic of Korea. Geotechnical and Engineering Geology, 21, 63-77.
- Lee, C.H., Kim, Y.T. and Lee, M.S., 2007, Provenance presumption for rock properties of the five-storied stone pagoda in the Jeongrimsaji temple site, Buyeo, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 43, 183-196. (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(3), 233-244. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.S., Kim, J.H., Lee, J.M. and Lee, J.J., 2011, Consolidation efficiency of in-situ application considering weathering grade and rock properties for stone cultural heritage in Yeongyang area, Gyeongsangbuk-do. Journal of Conservation Science, 27(3), 277-290. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.J., Kim, Y.S., Lee, M.H., Han, J.H. and Kim, M.S., 2012, Assessment and calibration of ultrasonic velocity measurement for estimating the weathering index of stone cultural heritage. Journal of The Korean Earth Science Society, 33, 126-138. (in Korean with English abstract)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Comprehensive academic research on the royal tombs of the Joseon dynasty. 2, 84-171. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2014, Conservation management of stone cultural heritage using nondestructive technology. 50-51. (in Korean)
- Yang, H.J., Lee, C.H., Choi, S.W. and Lee, M.S., 2006, Petrological characteristics and provenance presumption for rock properties of the stone pagoda in Mireuksaji temple site, Iksan, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 293-306. (in Korean with English abstract)
-