창녕 물계서원 원정비의 재질특성 및 손상도 평가와 균열심도 측정

유지현¹ | 이찬희¹ | 전유근*

공주대학교 문화재보존과학과, *국립문화재연구소 보존과학연구실

Material Characteristics, Deterioration Evaluation and Crack Depth Estimation for Mulgyeseowon Stele in Changnyeong, Korea

Ji Hyun Yoo | Chan Hee Lee¹ | Yu Gun Chun*

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University,
Gongju, 314-701, Korea

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

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

초 록 이 연구에서는 석조문화재의 표면 균열에 대한 깊이와 연장성을 측정하기 위해 창녕 물계서원 원정비를 대상으로 초음파 속도를 활용하였다. 또한 이 원정비의 장기적인 보존관리 방안을 수립하기 위해 재질 및 손상현황을 조사하고, 다양한 비파괴 기법을 활용하여 정밀진단을 수행하였다. 원정비를 이루고 있는 주요 구성암석은 비석의 부위에 따라 달리 알칼리장석화강암, 반려암 및 섬록암으로 이루어져 있다. 손상도 평가 결과, 특히 균열이 비신의 모든 방향에서 두드러진 분포를 보여 안정성을 저해하는 중요한 손상인자로 나타났다. 원정비 재질의 물성평가를 위한 초음파 측정에서는 비신, 대좌, 옥개석 순으로 속도가 빠르게 나타났다. 원정비에 다양한 형태로 발생한 균열들의 현황과 산출상태를 정량적으로 산출하기 위해 초음파를 이용한 To-Tc법으로 균열의 심도를 측정한 결과, 0.6~24.1cm로 다양한 깊이를 보였다.

중심어: 물계서원, 원정비, 손상도 진단, 초음파 속도, To-Tc 법, 균열

ABSTRACT To measure the depth and extension on the surface cracks of the stone monument, ultrasonic pulse velocity targeted at the Mulgyeseowon Stele in Changnyeong was used in this research. Additionally, to establish a long-term countermeasure of management and conservation for this stele, we have investigated the material properties and damage on it and have conducted a precise diagnosis by a variety of non-destructive techniques. Our research has revealed that stones of the stele are composed mainly of three rock types according to the parts of it, alkali-feldspar granite, gabbro and diorite. The result of the deterioration evaluation has occurred that cracks, which are observed from every direction in the body of the stele, are the significant factors to reduce structural stability. The ultrasonic velocity for an evaluation on the properties of the stele has revealed that the speed was high in the order of body, pedestal and crown. Furthermore, to understand the present condition and occurrences of the cracks which have measured in many different forms on the

stele quantitatively, we have estimated from 0.6 to 24.1cm deep of the cracks by To-Tc method using ultrasonic velocity.

Key Words: Mulgyeseowon, Stele, Deterioration evaluation, Ultrasonic velocity, To-Tc method, Crack

1. 서 론

석조문화재는 암석으로 만들어진 과거 문화예술의 산물이다. 우리나라 전체 유형문화재 중 26.8%가 석조문화재로 전국에 걸쳐 다양한 형태로 분포하고 있으며(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011), 역사적·예술적·학술적 가치 또한 높다. 이러한 중요성에도 불구하고 석조문화재는 별다른 조치 없이도 장기적 보존이 가능하다는 인식이 있었으며, 이로 인해 실질적인 관리나 보존을 위한 노력이 부족하거나 필요성을 인식하지 못하는 경우도 있었다.

그러나 암석 또한 오랜 기간 풍화를 경험하거나 인위적·자연적 사건에 의해 물성이 약화되면 다양한 손상과 훼손이 동반된다. 더욱이 석조문화재는 야외에 있는 경우가 대다수이므로 일교차 및 계절환경의 변화로 인해 풍화가 더욱 빠르게 진행될 수 있다. 이를 인식한 연구자 및 정부의 노력으로 최근 석조문화재의 안전진단 및 보존처리가 꾸준히 수행되고 있으며, 연구성과 또한 활발히 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2006; 2008; 2009; 2011; Jo *et al.*, 2012; 2014).

이러한 석조문화재 중 대표적인 것으로 비석이 있다. 비석은 형태에 따라 비(碑)와 갈(碣)로 나누기도 하며, 비문의 내용에 따라서는 기적비, 묘표, 신도비, 순수비, 탑비, 국경비 등으로 분류된다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2014). 원정비(院庭碑)는 서원 내에 세워진 기적비의 일종으로 서원을 세우게 된 유래 또는 배향된 인물에 대한 기록을 담고 있으며, 우리나라에서 문화재로 지정된 것이 2개에 불과하여 희소가치가 매우 높은 문화유산이다.

경상남도 문화재자료 제366호로 지정된 물계서원(勿溪書院) 원정비는 처음 세워진 이후 200년 이상의 세월이 흐르며 자연적 및 인위적인 요인에 의해 균열, 박리·박락 및 변색 등의 손상이 발생한 상태이다. 특히 비신 전체에 크고 작은 다양한 방향의 균열이 산재해 있다. 그럼에도 불구하고 이 원정비의 손상에 대한 조사 및 연구가 이루어지지 않아 현황 파악 뿐만 아니라 장기적인 보존방안도 없는 상태이다. 따라서 향후 보존과 복원을 위해 손상현황 진단이 반드시 요구되며, 특히 구조안정성을 저해하는 균열에 대해

정밀조사가 필요하다.

일반적으로 석조문화재의 표면 균열은 내부로 깊숙이 발달하여 전체적인 구조안정성을 위협하는 경우가 대부분이나 정확한 측정은 매우 어렵다. 초음파 속도를 활용한 To-Tc법은 대상물의 균열 깊이를 간접적으로 추정할 수 있는 방법으로써 국내외에서 다수의 석조문화재에 부분적으로 적용된 사례가 보고된 바 있으나(Pilecki and Levi, 1983; Christaras, 1998; Chun *et al.*, 2008; Ryu *et al.*, 2012; Maierhofer *et al.*, 2013), 종합적인 평가와 검토가 더욱 필요한 상황이다.

따라서 이 연구에서는 석조문화재에 발달한 균열대의 산출상태와 물성진단 및 균열 깊이를 산정하고자 초음파 속도를 활용한 정량적 기록화 연구를 수행하였다. 또한 물계서원 원정비의 보존처리 및 장기적인 관리를 위한 사전 연구로서 물성진단 및 손상도 평가를 수행하였다. 이 연구를 통해 획득된 결과는 석조문화재의 균열관리 및 비석 문화유산의 기록화와 보존관리계획 수립을 위한 중요한 자료가 될 것이다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 연구대상

물계서원은 경상남도 창녕군 대지면 모사리에 있다. 최초 건립시에는 고려 문하시중 성송국 선생의 효행을 기리는 창효사(彰孝祠)로 불렸다. 이후 조선 숙종 26년(1710) 유촌공 성환의 발의로 백산 북쪽 물계 위쪽에 사우를 건립하고 역시 성송국을 봉향하는 창효사(彰孝祠)로 현판하였다. 이를 숙종 35년(1719)에 세덕사(世德祠)로 개칭하고 매죽당 성삼문, 문두 성담수, 청송 성수침, 대곡 성은, 동주 성제원, 판곡 성윤해, 우계 성흔을 배향하였다(Cultural Heritage Administration of Korea, 2014).

영조 5년(1729)에 다시 8위의 위패를 봉향하고 물계서원으로 편액하였으며, 정조 14년(1790) 10월에 물계서원 원정비가 세워졌다. 이 비의 비문은 이복원이 찬자하였고, 조윤형이 썼다. 이복원은 후일 우상과 좌상을 역임하였으며 조윤형은 필법으로 명성을 떨친 인물로 물계서원 원정

비의 격을 짐작하게 한다. 이 원정비의 옥개석의 양 측면에는 두 마리의 새가 얼굴을 마주하고 몸은 반대하는 방향으로 새겨져 있고 옥개석 앞뒤 아랫부분은 2단씩으로 조각되어 서까래 같은 모양을 하고 있다(Figure 1). 비신의 네 면에는 서원의 유래와 배향 인물 19명의 내력이 새겨져 있다(Cultural Heritage Administration of Korea, 2014).

고종 3년(1866) 대원군의 서원철폐령에 따라 물계서원도 철거되었으나 원정비 및 비각은 남아 자리를 지키게 되었다. 이후 1995년 물계서원이 인근에 복원됨에 따라 2010년에는 원정비 또한 복원된 물계서원으로 이전하였다. 이 연구는 이전공사를 앞두고 수행되었으며, 당시 원정비의 좌측면, 우측면 및 후면은 민가의 담장으로 둘러싸여 있고 전면은 민가 사이로 난 좁은 도로에 접해 있었다(Figure 1A, 1B). 원정비를 보호하고 있던 비각은 해체되어 있는 상태였다.

2.2. 연구방법

이 연구에서는 석조문화유산의 균열에 대한 연구사례를 검토하고 정량적 기록화 기법을 모색하기 위해 초음파 응용방법을 적용하였다. 또한 물계서원 원정비의 재질특성을 밝힌 후 다양한 비파괴 분석방법을 활용하여 정밀진

단을 실시하였다. 사전조사의 일환으로 지역주민을 대상으로 원정비의 과거모습에 대한 인터뷰도 수행하였다. 재질분석을 위해 원정비에서 탈락된 미세 암편을 수습하였고 이를 대상으로 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사겸용 현미경을 사용하여 광물학적 조성 및 조직적 특징을 관찰하였다.

조암광물의 정밀한 동정을 위해 Rigaku사의 D/Max 2000 X-선 회절분석기를 활용하여 분석을 수행하였다. 여기에 타겟으로 사용한 X-선은 CuK α 이며 양극의 가속 전압 및 필라멘트의 전류는 각각 40kV와 100mA로 설정하였다. 원정비 구성암석의 자화강도를 측정하기 위해 ZH Instruments사의 SM-30 모델을 활용하여 전암대자율을 측정하였으며, 대자율의 세기는 10⁻³ SI 단위로 표기하였다.

이 원정비에 발생한 손상유형, 위치 및 분포를 현장조사와 고해상도 사진촬영을 통해 파악하였으며, 이를 토대로 손상지도를 작성하였다. 범례는 물리적 손상, 변색 및 이차오염으로 나누었으며 각 유형별로 손상율을 산출하였다. 원정비에 발생한 손상 중 육안으로 확인이 불가능한 내부 결함 탐색에는 타진법 및 적외선 열화상분석을 활용하였다. 이를 위하여 Flir사의 B200을 사용하였으며, 촬영 결과는 손상지도에 적용하였다.

원정비의 물성파악을 위해 CNS FARNELL사의 PUNDIT-

Figure 1. Appearance and lithological characteristics of the Mulgyeseowon Stele. (A) Front view, (B) Back and right view, (C) Alkali-feldspar granite in the crown, (D) Gabbro in the body, (E) Diorite in the pedestal.

plus를 사용하여 초음파 전달 시간을 측정하고, 각 측정값은 방위별 입면도에 투영하여 전체적인 풍화도를 분석하였다. 또한 균열이 존재하는 부분과 아닌 부분의 비교를 통해 균열의 심도를 추정할 수 있는 To-Tc법을 사용하여 비신에 분포하는 균열을 조사하였으며 이 결과를 도면으로 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재질특성

물계서원 원정비는 세 종류의 암석으로 이루어져 있다. 비의 상부를 구성하는 옥개석은 알칼리장석화강암이며, 비신과 대좌는 각각 반려암과 섬록암으로 구성된다(Figure 1). 구성암석의 암석학적 및 광물학적 특징과 풍화에 의한 변질광물 등을 확인하기 위해 탈락된 미세시편을 대상으로 편광현미경 관찰 및 X-선 회절분석을 실시하였다. 이는 대좌의 섬록암만 가능하였고 시료를 구할 수 없는 알칼리화강암과 반려암은 육안관찰을 통해 암상을 기재하였다.

옥개석을 구성하고 있는 알칼리화강암은 담황색의 세립 내지 중립질의 입상조직을 보인다(Figure 1C). 조암광물로는 1~3mm의 입자크기를 가진 알칼리장석, 사장석, 석영이 주를 이루며, 소량의 흑운모가 포함되어 있다. 암석의 일부에서는 미세결정의 성장과 수 mm의 정동이 관찰된다. 비신의 반려암은 각섬석, 휘석, 흑운모 등의 유색광물과 사장석 등이 주요 조암광물로 구성되어 있다(Figure

1D). 이 암석은 전체적으로 암흑색을 띠며 중립질 내지는 조립질의 입상조직을 보인다. 대좌를 구성하는 섬록암은 세립 및 중립질의 사장석, 흑운모, 각섬석, 방해석 등으로 구성되어 있으며 전반적으로 암청색을 띤다(Figure 1E).

대좌에서 박락된 암편을 수습하여 편광현미경으로 관찰한 결과, 섬록암은 1mm 이하의 사장석, 각섬석, 흑운모, 휘석과 1~3mm의 방해석 반상조직이 나타난다(Figure 2A, 2B). 조암광물은 전체적으로 알바이트 쌍정을 보이는 사장석과 쪼개짐이 발달한 각섬석이며, 반자형의 흑운모와 휘석이 소량 분포한다. 방해석은 이차적으로 형성된 교대광물로서 주로 원암의 공극이나 공동을 충전하여 산출된다. 이러한 조암광물은 대부분 풍화로 인해 변질된 상태로 관찰되어, 섬록암은 이미 상당한 화학적 풍화를 경험했음을 보여준다. X-선 회절분석 결과, 변질광물인 녹니석이 추가로 확인되었다(Figure 2C).

원정비 암석의 미세화 정도를 파악하기 위하여 대자율을 측정하였다. 이 결과, 옥개석의 대자율은 $2.77 \sim 5.32(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 분포를 보이며, 평균 $3.87(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 나타났다. 또한 대좌는 $4.42 \sim 8.01(\text{평균 } 6.33 \times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 로 산출되었으며, 비신은 $11.00 \sim 22.70(\text{평균 } 17.10 \times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이다. 이를 종합하면, 원정비를 이루는 각 암석들은 서로 뚜렷이 구분되는 자화강도를 보였다. 특히 비신을 이루는 반려암의 대자율은 모두 $10.00(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이상의 높은 수치로 옥개석 및 비신의 대자율과 확연한 차이를 나타냈는데, 이는 앞서 분류된 각 암석들의 성인적 차별성을 뒷받침하는 결과이다.

3.2. 손상도 평가

원정비에 발생한 다양한 손상은 비신의 사방에 새겨진 금석문, 옥개석과 대좌의 문양 및 형태 등 원형을 변형시켜 미술사적 가치를 떨어뜨릴 수 있다. 원정비 인근 주민과에 따르면 한국전쟁 때 원정비를 보호하고 있는 비각이 화재를 입어 무너졌었다는 증언을 들을 수 있었다. 따라서 비신의 균열은 자연적 풍화작용 이외에도 열 충격에 의한 손상이 큰 요인으로 작용했음을 알 수 있다. 이들 균열은 향후 지속적으로 발달할 경우 부재의 물성 저하와 구조적 불균형을 유발할 가능성이 높은 중요한 손상인자이다.

균열은 비신의 모든 방향에서 다수 발생하였으며, 일부는 비신의 여러 방향에 걸쳐 길게 이어져 있다. 균열 중 일부는 전면과 후면을 관통하는 형태로 깊게 나타나며, 이들 주위로 비교적 깊이가 얇은 균열이 동반한다. 각 방향에서

Figure 2. (A, B) Photomicrographs showing mineral compositions of plagioclase, amphibole, biotite, calcite and diopside at the pedestal rock. (C) X-ray diffraction patterns of the pedestal rock. Ch; chlorite, B; biotite, A; amphibole, P; plagioclase, Cal; calcite, Di; diopside.

균열의 규칙성은 없으나 주로 수평 및 수직 균열로 구분할 수 있다. 균열은 대부분 평균 깊이가 1cm 이상으로, 이 이하의 깊이를 갖는 미세균열은 관찰되지 않았다.

탈락은 주로 비신 모서리 부분에서 다양한 크기로 나타나며 이들의 대부분은 시멘트로 충전처리되었다. 마모는 옥개석 및 대좌 모서리에서 주로 관찰되며 대좌의 상부에서 특히 두드러진 손상을 보였다. 이외의 물리적 손상으로 박리와 박락이 비신과 대좌에서 국소적으로 발생하고 있으나 다른 손상유형에 비해 양호한 상태이다. 이는 보호각이 큰 역할을 한 것으로 판단된다.

비신에 발생한 박리는 비문에 직접적인 손상을 줄 수 있으므로 보다 정확한 박리영역 검출을 위해 타진법 및 적외선열화상 분석을 이용해 박리부를 검출하였다. 적외선열화상 분석은 외부에서 근적외선 전기히터를 사용하여 인위적인 미열을 가한 후 열분포의 차이를 파악하는 방법을 사용하였으며, 압석과 내부 결함의 열특성 차이에 의해 발생한 온도의 차별분포를 통해 비신의 한 지점에서 육안으로는 보이지 않는 박리(19.27cm²)가 발생한 것을 확인하였다.

한편 과거 보존처리 시 옥개석과 비신 사이에 사용된 보수물질과 이 보수물질에 의해 발생한 이차적 손상도 관찰되었다. 최근에 보수물질로 사용한 시멘트 모르타르와 수분이 반응하여 유동흔적이 형성되었고, 이 유동흔적을 따라 집중적인 백화현상이 발생하였다. 이외에 생물학적 손상이 원정비를 구성하는 부재에 따라 차별적으로 발생하

고 있다. 비신과 대좌는 상대적으로 생물에 의한 손상이 적으나 옥개석에는 얇은 피막 형태의 지의류가 점이적으로 분포한다. 특히 옥개석의 처마 부분에 생물오염이 집중된 상태이다.

원정비의 손상도를 정량적으로 평가하고 향후 보존처리에 이용할 수 있도록 앞서 관찰한 손상 유형별로 범례를 작성하였으며, 이를 토대로 유형별 손상지도를 작성하였다. 문화유산의 손상형태와 범주를 자료화하는 기재방법인 손상지도법은 세계적으로 널리 활용되고 있다(Fitzner *et al.*, 1990; Inkpen *et al.*, 2001; Ryu *et al.*, 2012; Lee *et*

Table 1. Comprehensive deterioration rate of the Mulgyeseowon Stele.

	Front	Left	Back	Right	Total
Crack (mm)	5,685	3,311	7,254	526	16,775
Scaling (%)	0.00	0.00	0.08	0.00	0.03
Scaling-off (%)	0.06	0.00	0.04	0.15	0.06
Break-out (%)	0.00	0.07	0.43	0.70	0.27
Abrasion (%)	0.04	0.06	0.12	0.05	0.08
Discoloration (%)	17.78	9.39	29.59	18.93	20.78
Biological damage (%)	1.87	15.27	16.91	7.88	10.07
Cement (%)	1.33	1.70	0.00	0.85	0.85
Soil (%)	0.00	0.00	0.00	1.50	0.23

Figure 3. Deterioration map of the Mulgyeseowon Stele.

al., 2013). 원정비의 손상지도는 면밀한 현장조사 후 사진 맵핑을 통한 디지털도면화 작업을 거쳐 완성하였다(Figure 3).

이 손상지도를 토대로 원정비의 손상유형, 방위별 손상 면적을 백분율로 수치화하였고, 이를 이용하여 원정비의 종합적인 손상도를 정량적으로 평가하였다(Table 1; Figure 4). 원정비에 존재하는 물리적 손상 중 균열은 총 29개로 모두 비신에 집중되어 있었으며, 특히 비신의 여러 방향에 걸쳐 분포하여 복잡한 양상을 보인다. 따라서 여기서는 방위에 따른 발달양상을 파악하기 위하여 같은 균열이더라도 방위에 따라 세분화였다. 이 결과, 조사된 균열은 총 42개로

나누어졌으며 최단균열은 약 44mm이고, 최장균열은 약 1,810mm로 나타났다. 방위별 양상에서는 균열의 대부분이 전면보다는 후면에, 우측면보다는 좌측면에 상대적으로 많이 발달한 것으로 조사되었다.

탈락은 비신의 상부에서 국소적으로 관찰되며 전체 면적의 0.27%를 차지하고 있다. 현재 탈락 부위의 대부분은 시멘트로 보수되어 있다. 시멘트는 비신의 상부와 탈락부, 대좌 하부에서 나타나는데 대좌를 제외한 부분의 시멘트는 보수를 위해 사용된 것이다. 박리는 비신 후면에서만 관찰되며 점유율은 0.03%이다. 박락은 박리부 옆과 후면 옥

Figure 4. Directional deterioration rate graphs of the Mulgyeseowon Stele.

개석에서 나타나며 손상율은 0.06%이다. 옥개석과 대좌의 모서리에서 주로 관찰되는 마모는 총 0.08%의 손상 면적을 보였다.

원정비에 나타난 무기물 기원의 변색은 비신의 모든 방위에 걸쳐 폭넓게 분포한다. 특히 균열대를 따라 발생한 변색은 주로 백화현상을 나타내며, 상대적으로 물리적 손상이 양호한 부분은 미세면지가 피복된 황색 변색층이 관찰된다. 이를 손상율로 산출하면 변색은 원정비 전체의 20.78%를 차지하여 모든 훼손 유형 중 가장 많은 면적을 나타냈다. 생물학적 손상이 발생한 영역은 전체면적의 10.07%를 차지하였다. 특히 이들 지의류 군집은 옥개석에서 집중적인 분포를 보여 비신에서만 나타나는 변색과 대조를 이루었다. 토양의 경우, 우측면 대좌 하단의 일부(1.50%)를 피복하고 있다.

Figure 5. Ultrasonic velocity showing direct-indirect method for gabbro of the Mulgyeseowon Stele.

이러한 원정비 손상율의 방위별 양상을 살펴보면, 전반적으로 변색 및 생물이 물리적인 손상보다 두드러진 것으로 관찰된다. 이중 변색은 후면이 전면보다 우측면이 좌측면보다 높은 손상율을 보였다. 한편 생물학적 손상은 좌-우측면 및 특히 후면에서 높게 나타난다. 이는 원정비의 좌-우측면과 후면이 인접해 있는 민가의 담장으로 인해 형성된 그늘이 습한 환경을 조성하여 발생한 결과로 해석된다.

3.3. 초음파 물성진단

초음파탐상법은 매질의 물성과 상태에 따라 음향특성을 나타내는 초음파를 이용한 비파괴검사 방법이다. 이는 대상물의 손상 없이도 조사를 가능하게 하므로 문화유산의 진단에 유용하게 사용할 수 있다. 이 연구에서는 원정비 암석의 물성을 밝히기 위하여 초음파탐상법을 적용하였으며, 끝이 뾰족하여 표면의 요철에 대응하기 유리한 탐촉자인 UTREXTXRX(54kHz)를 사용하였다. 탐촉자의 배열 방법은 간접법, 배열거리는 20cm로 하였으며 접촉매질로는 고무찰흙을 사용하였다.

간접법은 직접법에 비해 초음파 전달속도의 오차가 발생하므로 보정계수를 적용해야 하며, 보정계수는 암석의 종류, 광물의 함량 및 크기 등에 영향을 받는다. 따라서 알칼리장석화강암(옥개석), 반려암(비신) 및 섬록암(대좌)로 구성되어 있는 원정비는 암석의 종류별로 각기 다른 보정계수를 설정할 필요가 있다. 이 연구에서는 알칼리장석화

Figure 6. 2D contour map using ultrasonic velocity of the Mulgyeseowon Stele.

강암과 섬록암에는 Lee *et al.*(2009)이 제시한 보정계수를 적용하였으며, 반려암은 직접법 및 간접법의 초음파속도를 측정하여 Figure 5와 같이 보정식을 산출하여 적용하였다.

원정비의 전면 66지점, 좌측면 25지점, 후면 65지점, 우측면 26지점(총 182지점)을 대상으로 초음파 측정을 실시하였다. 이렇게 측정된 값으로 방위별 도면상에 2D모델링을 실시하였다(Figure 6). 이 결과, 반려암으로 구성된 비신은 균열에 의한 손상이 심각함에도 불구하고 균열이 발생하지 않는 영역에서는 5,037~5,542^{m/s}(평균: 5,366^{m/s})의 매우 높은 초음파속도를 보였다.

반면 섬록암으로 이루어진 대좌는 3,182~4,476^{m/s}(평균: 3,690^{m/s})으로 비신보다 상대적으로 낮은 초음파속도를 보였고, 화강암으로 이루어진 옥개석은 2,221~4,144^{m/s}(평균: 3,441^{m/s})로 가장 낮은 초음파속도를 나타냈다. 이러한 부재별 초음파속도의 차이는 석재가 풍화되는 과정에서 암석 간의 차별풍화로 인한 것일 수 있으나, 기본적으로는 암석의 종류에 따른 물성 차이가 반영된 것으로 판단된다.

각 방위별 초음파속도를 비교하면 비신의 경우 전면의 초음파속도는 5,431^{m/s}로 다른 측정면 보다 100~200^{m/s} 정도 빠르게 나타났다. 그러나 표준편차를 고려하면 비신은 전반적으로 고른 물성을 나타내는 것으로 판단된다. 옥개석에서 전면, 좌측면 및 우측면의 초음파속도는 전반적으로 표준편차 내에서 분포하며 유사한 속도를 보인 반면, 후면은 2,870^{m/s}로 상대적으로 낮은 속도를 나타냈다. 대좌를 구성하는 섬록암의 방위별 속도에서는 우측면이 3,593^{m/s}로 다른 면에 비해 상대적으로 느린 값을 보였다. 이를 종합하면, 원정비 구성암석의 상대적인 물성은 비신(반려암), 대좌(섬록암), 옥개석(화강암) 순으로 높게 나타났다. 또한 각 방위별 초음파속도의 분포는 전반적으로 유사한 것으로 확인되었으나 전면이 다른 면보다 상대적으로 높

은 물성을 보였다.

3.4. 균열 깊이 측정

원정비 비신에는 모든 방위에 걸쳐 다양하게 나타나는 균열이 비신의 물리적인 손상을 초래할 수 있는 중요한 손상인자이다. 이 연구에서는 손상지도에서 작성된 균열 분포를 토대로 초음파를 활용하여 원정비에 나타난 균열의 심도를 측정하였다. 초음파를 이용한 균열심도 측정법은 특정주파수의 변화로 상대적인 균열 깊이를 측정하는 방법으로, 불균질한 매질에서는 측정시점을 판정하는 기준이 모호하므로 상대적인 시간차를 통해 깊이를 추정할 수 있다.

To-Tc법은 콘크리트 진단분야에서 응용된 균열심도 측정법이다(Rhim *et al.*, 2002; Chun *et al.*, 2008). 이 기법은 균열을 중심으로 좌우에 동일한 간격으로 종파용 발진자와 수신자를 배치한 후 전달시간(Tc)을 측정하고(Figure 7A) 동일한 거리로 균열이 없는 부분에서의 초음파 전달시간(To)을 측정하여(Figure 7B), 이들의 비교를 통해 균열깊이를 계산하는 방법이다. 균열 깊이의 계산식은 아래 (1)과 같다.

$$D = \frac{L}{2} \sqrt{(T_c/T_o)^2 - 1} \quad (1)$$

여기서 D는 표면에서 수직방향의 균열깊이(cm), L은 발진자와 수신자 사이의 거리(cm)이다. 측정대상 균열은 비신에 존재하는 29개 중 건전부와 균열부의 비교측정이 가능하고 미세 균열이 아닌 19개를 선택하였다. 또한 선택된 균열에서 총 132지점(전면 55지점, 좌측면 18지점, 후면 52지점, 우측면 7지점)에서 초음파 전달시간을 측정하였다.

Figure 7. Schematic diagram showing path of ultrasonic wave in crack. (A) Tc, (B) To.

초음파로 측정된 균열부위의 초음파 전달시간은 최소 56.2 μ s부터 최대 137.8 μ s까지 균열의 심도에 따라 서로 다르게 나타났다. 이를 균열이 없는 부분의 전달시간과 비교하여 균열심도를 계산한 결과, 균열의 깊이는 최대 24.1cm,

최소 0.6cm로 산출되었다. 이 결과를 2D 모델링 기법으로 Figure 8에 제시하였다. 여기서 대부분의 균열 심도는 비신의 좌측면과 후면의 중앙부에서 상대적으로 깊게 나타났다. 이로 미루어 보아 원정비에 발생한 균열은 비신 후면

Figure 8. Crack depth map using ultrasonic velocity (m/s) of the Mulgyeseowon Stele.

Figure 9. Crack map of the Mulgyeseowon Stele. (A) Numbering crack for the Mulgyeseowon Stele (+; measurement point of ultrasonic velocity), (B) Sectional view of horizontal crack in the body of the Mulgyeseowon Stele.

의 중앙 및 좌측면에서 발생하여 반대편으로 진행된 것으로 유추할 수 있다.

측정결과를 바탕으로 각 균열별 상태에 대한 정밀 평가를 위해 가로 및 세로로 발달한 균열에 각각의 번호를 부여하였다(Figure 9A). 또한 가로 방향으로 나타난 균열의 경우 원정비의 여러 방향에 걸쳐 신장되어 있는 것이 많으므로 비신 내부에서의 위치를 파악하기 용이하도록 위에서 내려다 본 단면도 형태로 나타내어 방향별 균열을 도시하였다(Figure 9B). 이 결과, 4번 균열은 비신의 전면에서 후

면까지 관통되었을 가능성이 있으며 3번, 6번, 8번 균열은 비신 두께의 약 반 정도로 깊이 발달해 있는 것으로 나타났다.

Figure 10은 Figure 9A에 도시된 균열들의 깊이를 분산 그래프(scatter graph)로 나타낸 것이다. 원정비의 균열은 좌측방향을 중심으로 하여 사방으로 넓게 분포해 있으며, 가로방향의 균열이 세로방향의 것보다 연장성이 우세한 것으로 나타났다. 또한 원정비 우측면에서는 가로방향의 균열만 일부 존재했으며 세로 방향의 균열은 나타나지 않아 각 방위 중 가장 양호한 모습을 보였다. 이러한 심도 깊

Figure 10. Graphs showing crack depth of the Mulgyeseowon Stele. Crack numbers are represented in Figure 9.

은 균열들은 외부의 충격 및 물리화학적 작용으로 더욱 진행될 수 있다. 이는 결과적으로 비신의 구조적 불안정을 초래하여 더욱 큰 손상을 야기할 위험성이 있으므로 균열부위에 대한 보존처리 및 지속적인 모니터링이 필요하다. 또한 석조문화재에 발달한 균열의 심도와 연장성 측정 및 정량적 평가를 위한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

4. 결 론

1. 물계서원 원정비의 옥개석은 알칼리장석화강암, 비신은 반려암이며 대좌는 섬록암으로 구성되어 있다. 옥개석의 알칼리장석화강암은 담황색의 세립 내지 중립질의 입상조직을 보이며 부분적으로 정동이 관찰된다. 비신을 이루는 반려암은 암흑색을 띠며 중립질 내지 조립질 조직으로 각섬석, 휘석, 흑운모 등의 유색광물과 사장석을 조암광물로 하고 있다. 또한 대좌에 사용된 섬록암은 세립 및 중립질의 입상조직에 사장석, 흑운모, 각섬석, 방해석 등으로 구성되어 있으며 전반적으로 어두운 청색을 띤다.

2. 손상도 평가 결과, 물리적인 풍화양상 중 균열이 비신 전면에 걸쳐 분포하고 있었으며 표면변색 및 생물학적 손상 또한 뚜렷하게 나타났다. 이중 무기물변색은 후면, 우측면, 전면, 좌측면 순으로 높은 손상율을 보였다. 원정비의 좌우측면과 후면에서 전반적인 손상율이 높게 나타나는 이유는 이들 방향에 민가의 담장이 인접해 있어, 그들로 인한 습한 환경이 형성되었기 때문인 것으로 해석된다.

3. 초음파 측정결과, 부재의 평균 물성은 비신(평균 5,343㎍), 대좌(평균 3,885㎍), 옥개석(평균 3,169㎍) 순으로 나타났다. 이는 각 암석이 가진 고유의 물성에 따른 차이로 해석된다. 방위별 초음파속도는 옥개석의 경우 후면에서, 비신의 경우는 후면 및 좌측면에서, 대좌는 우측면에서 각각 낮게 측정되었다. 이는 표면변색을 비롯한 손상양상의 방위별 손상율과 일치하는 것이다.

4. 초음파를 이용하여 균열의 심도를 산출한 결과, 비신에 발생한 균열은 0.6~24.1cm의 다양한 심도를 나타냈다. 균열들은 서측면을 중심으로 남측면과 북측면에 주된 분포를 보였다. 이중 비신의 중앙에서 가로방향으로 발달한 하나의 균열이 관통형 균열로 추정되며, 이외에 3개의 균열들에서도 비신 두께의 반에 가까운 깊은 심도가 측정되었다.

5. 원정비에 발생한 균열은 외부의 충격 및 물리화학적 작용으로 심화되어 더 큰 손상을 야기할 수 있을 것으로 판단되므로 균열부위에 대한 충전 등 보존처리와 사후검토

가 필요하며, 정기적인 사진기록과 전문가의 현황조사 등을 통한 지속적인 모니터링이 요구된다. 또한 균열의 발달이 심화될 경우 국보 제47호인 쌍계사 진감선사 대공탑비 등에 적용된 선례가 있는 프레임의 사용을 검토할 필요가 있다.

REFERENCES

- Christaras, B., 1998, Non-destructive methods used for the estimation of the damage (weathering and cracks) of the building and ornamental stones. PACT 55 (Revue du Conseil de l' Europe), 213-219.
- 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 with English abstract)
- Cultural Heritage Administration of Korea, 2014, <http://www.cha.go.kr/korea/heritage>.
- Fitzner, B., 1990, Mapping of natural stone monuments -Documentation of lithotypes and weathering forms. Proceedings of the Advanced Workshop "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones", Pavia, Sep 14-21.
- Inkpen, R.J., Fontana, D. and Collier, P., 2001, Mapping decay : Integrating scales of weathering within a GIS. Earth Surface Processes and Landforms, 26, 885-900.
- Jo, Y.H. and Lee, C.H., 2014, Quantitative modeling and mapping of blistering zone of the Magoksa Temple stone pagoda (13th century, Republic of Korea) by graduated heating thermography. Infrared Physics and Technology, 65, 43-50.
- Jo, Y.H., Lee, C.H., Yoo, J.H., Kang, M.K. and Kim, D.M., 2012, Petrological classification and provenance interpretation of the Sungnyemun stone block foundation, Korea. Journal of Cultural Heritage Studies (MUNHWAJAE), 45, 174-193. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Kim, J., 2011, Damage evaluation and conservation treatment of the tenth century Korean rock-carved Buddha statues. Environmental Earth

- Science, 64, 1-14.
- 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., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J.Y., 2006, Deterioration assessment and conservation of a heavily degraded Korean stone Buddha from the 9th Century. *Studies in Conservation*, 51, 305-316. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Yi, J.E., Shin, E.J. and Kim, S.D., 2008, Deterioration degree and petrological characteristics of the 10th-storied Stone Pagoda in Gyeongcheonsa temple, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 765-779. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.S., Kim, J., Lee, C.H., Kim, Y.T. and Han, B.I., 2013, Conservation treatment, deterioration assessment and petrography of the Hongjimun Ogansumun (Five-arched Floodgates) in Seoul. *Journal of Conservation Science*, 29, 1-14. (in Korean with English abstract)
- Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Myrach, P., Meinhardt, J., Kalisch, U., Hennen, C., Mecke, R., Seidl, T. and Schiller, M., 2013, Monitoring of cracks in historic concrete structures using optical, thermal and acoustical methods. *Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management*, 625-632.
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Restoration Scheme for Material Loss and Rock Properties of Stone Cultural Heritage. 4. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2014, <http://gsm.nricp.go.kr>.
- Pilecki, S. and Levi, A., 1983, Evaluation of surface crack-depth in marble historical monuments with ultra-sonic methods. *Proceedings of the 1st International Conference on Non-Destructive Testing in Conservation of Works of Art, Rome*, 27-29 Oct., 1-8.
- Rhim, H., Kim, Y., Woo, S. and Song, Y., 2002, Measurement of crack depth located under steel reinforcement in reinforced concrete specimens using ultrasonic method. *Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 6, 181-188. (in Korean with English abstract)
- Ryu, K.S., Kim, J., Chun, Y.G., Han, D.R. and Lee, C.H., 2012, Material characteristics and deterioration evaluation of the Gyosan-ri Seated Stone Buddha Statue in Hamyang, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 521-532. (in Korean with English abstract)
-