

충주 정토사지 홍법국사탑비의 보존과학적 연구

Study for the Conservation
Treatment of the *Stele for
National Preceptor Hongbeop*
from the Jeongtosa Temple Site
in Chungju

채우민^{1*}, 황형성²

국립문화재연구소 건축문화재연구실¹, 국립부여
박물관 학예연구실²

Chae Woomin^{1*}, Hwang Hyunsung²

Architectural Research Division, National
Research Institute of Cultural Heritage¹,
Curatorial Affairs Division, National Museum
of Buyeo²

* Corresponding Author:
Chae Woomin

Tel: 82-63-836-7932
E-mail: woomin135@korea.kr

요약

충주 정토사지 홍법국사탑비(본관1960)는 고려시대의 양식적 특징을 보여주는 중요한 석조문화재이다. 홍법국사탑비는 일제강점기에 수차례 반복된 부재의 해체 및 이동과 동시에 장기간 야외에 노출되어 풍화가 진행된 상태였기 때문에 국립중앙박물관 수장고에 보관되어 왔다. 이 연구에서는 2015년 국립중앙박물관에서 주관하는 석조물복원사업의 일부 대상인 홍법국사탑비의 야외 전시를 위해 재질특성을 규명하고 풍화훼손지도 및 초음파 물성진단을 활용한 손상도 진단을 실시하였으며, 이를 바탕으로 보존처리를 진행하였다. 재질분석 결과, 탑비의 귀부는 중립질 입자크기를 가지는 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 백운모를 구성광물로 가지는 복운모 화강암이다. 탑비의 비신은 담홍색을 띠며 암회색이 혼재되어 나타나고 중립질의 방해석을 조암광물로 가지는 결정질 대리암이다. 이수에는 회백색으로 중립질의 방해석을 주요 구성광물로 가지는 결정질 대리암이다. 탑비에서 나타나는 각각의 훼손유형별 점유율 산출 결과 비신에서는 마모로 인한 훼손이 28.29%로 남측면이 가장 높으며, 이수에서는 입상분해로 인한 훼손이 11.08%로 북측면이 심한 것으로 나타났다. 초음파 물성진단을 통해 탑비의 전체적인 풍화도를 파악한 결과 귀부에서는 결구부를 중심으로, 비신에서는 상단부에서 낮은 값을 보였으며, 이는 표면 가공도의 차이와 부분적인 박리 및 균열로 인해 변위가 발생한 것으로 판단된다. 홍법국사탑비의 야외 전시에 앞서 과학적 조사를 바탕으로 외부환경에 의한 풍화를 억제하고자 표면 오염물제거와 표면 강화처리를 진행하였다.

주제어 : 탑비, 재질분석, 손상도 진단, 보존처리

Abstract

The *Stele for National Preceptor Hongbeop* from the Jeongtosa Temple site in Chungju is one of the most important stone cultural heritage items for exemplifying the style of the Goryeo era. Despite its obvious value, this relic has been stored in a weathered condition at the National Museum of Korea. It had suffered various dismantling and displacements during the Japanese colonial period and had long been exposed in the open air.

The stele was selected as a subject for the Stone Monuments Restoration Project launched by the National Museum of Korea in 2015. In preparation for its outdoor exhibition as part of the restoration project, this study investigated the characteristics of its materials, produced a map of its deterioration from weathering, and carried out ultrasonic analysis of the materials to provide findings useful for conservation treatment. The materials analysis revealed that the turtle-shaped pedestal of the stele was made from two-mica granite consisting of medium-grained quartz, plagioclase, alkali feldspar, biotite, and muscovite. Its body stone is crystalline marble, the rock-forming mineral in which is medium-grained calcite in a rose-pink color with dark grey spots. The dragon top of the stele is made of crystalline marble, the major component of which is medium-grained calcite of a light-grey color. The deterioration consists of 21.5% abrasion on the stone body, with its south face most damaged, and 18.6% granular disintegration, with the north face most damaged. The ultrasonic material characterization conducted for mapping the general condition of weathering shows low values on the parts-assembly area of the turtle-shaped pedestal and on the upper portion of the stone body. It is considered that there is dislocation due to partial blistering and fracturing as well as to the differences in surface treatment. Prior to the outdoor exhibition of the stele, the surface was cleaned of contaminants and was consolidated based on the scientific investigation in order to prevent weathering from the external environment.

Keywords : Stele, Materials analysis, Deterioration diagnosis, Conservation treatment

투고일: 2018. 3. 8. 심사(수정)일: 2018. 4. 11. 게재확정일: 2018. 5. 4.

1. 서론

국립중앙박물관 소장 충주 정토사지 홍법국사탑비(본관1960)는 보물 제359호로 지정된 고려시대 탑비이다. 홍법국사탑비는 원래 충청북도 충주시 동량면 하천리의 정토사지에 있던 것으로 일제강점기에 원위치에서 반출되었다. 홍법국사탑비는 귀부가 거북모양의 형태를 갖추지만 머리는 용의 형태를 갖추고 있어 통일신라 후기에서 고려 전기의 양식적 특징을 보이는 역사적, 학술적으로 중요한 석조문화재이다.

홍법국사탑비는 대부분의 석조문화재와 마찬가지로 오랜 기간 외부환경에 노출되어 물리적, 화학적 풍화가 복합적으로 진행된 상태였다. 때문에 장기간의 보존처리가 필요한 문화재로 분류되어 국립중앙박물관 수장고에 보관되어왔다. 최근 국립중앙박물관에서 주관하는 석조물복원사업의 일환으로 홍법국사탑비의 야외전시가 결정되었으며, 이를 계기로 홍법국사탑비의 보존 관리 측면에서 각 부재의 손상도 진단과 보존처리를 실시하게 되었다.

홍법국사탑비의 부재는 두 가지 이상의 암석으로 구성되어 있으며, 비신과 이수(水首)는 다른 암석에 비해 상대적으로 풍화에 취약한 특성을 가진 대리암이다. 최근 환경오염으로 인한 문제점이 대두되면서 이로 인해 발생하는 산성비와 대기오염



도1. 정토사 터의 홍법국사탑비
(국립중앙박물관 유리건판번호22419)



도2. 경복궁 내의 홍법국사탑비
(국립중앙박물관 유리건판번호022380)

물질은 석조문화재의 풍화를 가속화 시키는 잠정적인 요인이라 할 수 있다. 때문에 풍화된 부재 일부를 신석재를 이용하여 보강하는 경우가 종종 발생하고 있어 원부재와 동질성을 갖는 신석재를 확보하기 위해서는 구성 암석의 과학적 조사를 통한 기초자료 확보가 필요하다.

그러나 지금까지 홍법국사탑비에 대한 연구는 미술사학적 분야에서 진행되어 왔으며, 최근 탑비에 대한 현황 및 건립과정에 대한 내용이 발표된 바 있으나 홍법국사탑비의 재질특성 및 손상도 진단을 바탕으로 진행한 보존과학적 연구는 미비한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 홍법국사탑비의 보존을 위해 각 부재의 재질특성 규명과 전체적인 손상도를 진단하여 기초자료를 제시하고 보존처리 과정을 정리하고자 하였다.

II. 현황 및 연구방법

1. 현황

홍법국사탑비는 홍법국사가 입적한 후 업적을 기리고자 세운 부도탑비로 귀부와 비신, 이수가 완전히 갖추어져 비교적 상태가 양호하다. 탑비의 높이는 총 3.75m이며, 귀부와 이수는 왜소하고 낮아져 안정적인 감은 있으나 고려 전기의 웅장한 기상은 많이 퇴화되었다. 귀부에서 다소 투박해 보이는 용두의 모습과 낮은 비좌 주위로 운기문이 둘러져 있는 점은 943년 정토사지에 건립되었던 법경대사자등탑비와 유사하다. 또한 이수에만 갖춰지던 제액이 비신 상단에 새겨지게 된 것은 주목할 만한 점으로 고려 초기 1017년경에 조성된 시대적 수법을 잘 보여주는 중요한 문화재이다^[2].

홍법국사탑비는 조선총독부박물관에서 발행한 『박물관진열품도감』에 의하면 일제강점기인 대정 4년에 조선총독부박물관 후정진열석조물 목록에 포함되어 있었으며, 조선물산공진회의 출품 목적으로 원위치에서 반출된 것으로 추정된다^[3]. 이후 수년간 경복궁에 전시되어 있었으며, 경복궁 복원 정비 사업의 이유로 1996년 해체되어 국립중앙박물관 수장고에 보존되어왔다.

홍법국사탑비의 비신과 이수에서는 대부분 입상분해 및 박리 현상이 확인된다. 일부에서는 합성수지를 이용한 보수흔적이 확인되고 수지는 변색과 박락을 동반한다. 과거에 실시된 조사 내용 및 보존처리 방법에 관한 자세한 내용은 기록되어 있지 않다.

2. 연구방법

각 부재별 재질특성을 파악하기 위해 지질도를 이용한 실내조사와 편광현미경(Leica, DMLP, Microscope, Germany) 관찰, 전암대자율(ZH Instruments社의 SM-30)을 측정하였으며, 대자율의 단위는 $\times 10^{-3}$ SI unit 이다. 또한 X-선 회절분석기(Philips社의 XPERT MPD) (PhilipsX'pert PW304/00)를 이용하여 구성암석의 조암광물을 동정하였다. X-선 회절분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하였으며, X-선은 CuK α 에 조건은 30mA와 40kV였다. 조사를 위한 시료는 원부재에서 탈락된 소량의 시편을 수습하여 활용하였다.

탑비의 손상도 진단을 위해 Auto CAD 프로그램을 이용하여 풍화훼손지도를 작성하였으며, 손상 유형별 비교를 위해 점유율을 산출하였다. 탑비의 전체적인 풍화도를 확인하고자 초음파 물성진단을 수행하였다. 측정을 위해 사용된 기기는 CNS FARNELL社의 초음파비파괴시험기 PUNDIT PLUS이다. 측정방법은 끝이 뾰족한 탐촉자를 사용하여 간접전달방식을 이용하였다. 보존처리는 오염물제거와 표면 강화처리 순으로 진행하였다.

Ⅲ. 재질특성 및 손상도 진단

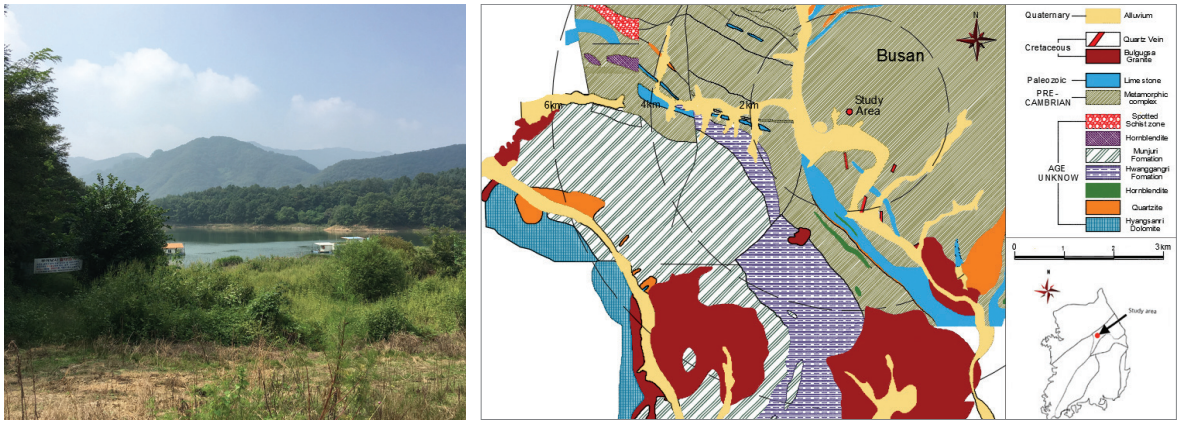
1. 재질특성 분석

1.1. 암석 분포

홍법국사탑비의 원위치인 정토사지를 중심으로 주변 일대의 지질 분포도를 파악하였다. 정토사지 일대의 기반암은 선캄브리아기 변성암류로 대석회암통의 지층이 덮여 있으며 시대미상의 서창리층이 변성암 위에 부정합으로 관입되어 있다. 정토사지의 남부를 중심으로 길게 노출된 석회암층은 조선계 대석회암통의 상부에 해당하는 지층이며, 남서부와 남동부에서 백악기말 불국사통 화성암류가 넓게 분포하고 있다^[4].

연구 지역을 중심으로 2km 떨어진 지점에서는 남서부와 남동부에 걸쳐 삼태산층의 석회암이 대상 분포하며, 약 3km 지점의 남부에는 흑운모 화강암이 소규모 암주상대로 분포하고 있다. 남서부와 남동부에서는 백악기말 불국사통 화성암류가 넓게 분포하고 있다. 북부지역은 화강암화 작용에 기인하여 화강암 조직을 띠고 광역변성작용의 변질도의 차이에 따라 일부에서 국부적으로 편마암계열의 암석이 혼재되어 나타난다^[5]. 또한 서북부지역의 부산(婦山)을 중심으로 산릉 일대에서

혼성변성암이 분포하고 있다. 결과적으로 정토사지의 주변 지질은 불국사 화강암체 관입의 영향에 따라 열과 압력에 의해 직·간접적으로 변성작용이 발생했을 것으로 사료되며, 이로 인해 다양한 석회암이 혼재되어 나타날 가능성이 높은 것으로 판단된다^{[6] (도3b)}.



도3. 현재 정토사 터와 주변 지질도

a

b

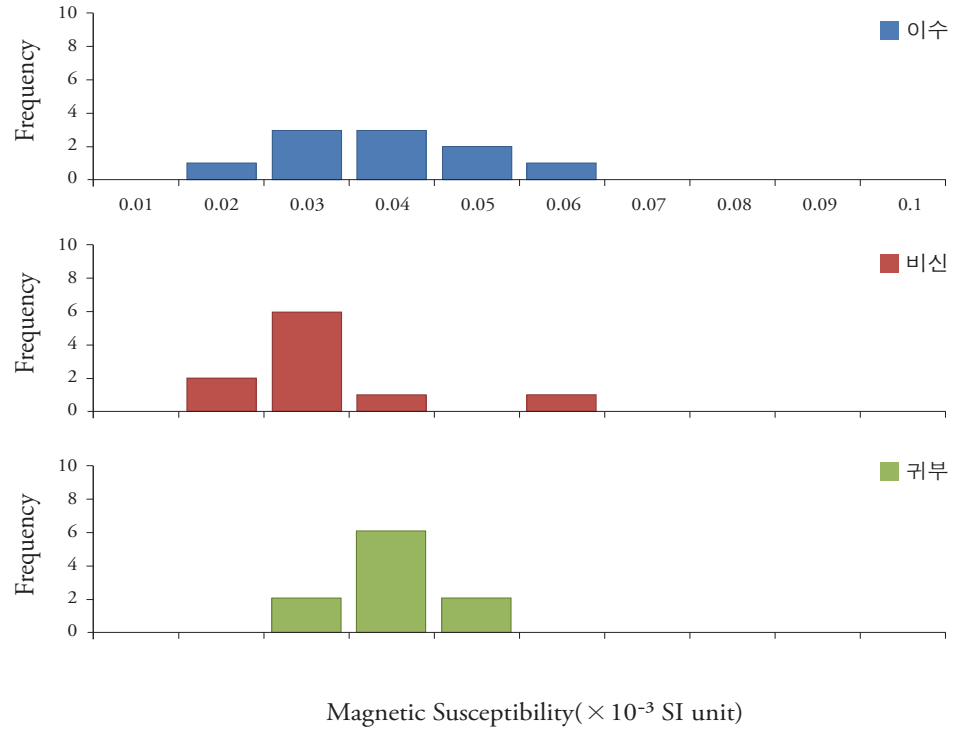
(a) 정토사 터
(b) 주변 지질도

1.2. 전암대자율 측정

홍법국사탑비를 구성하는 암석의 자화강도를 알아보기 위해 전암대자율 측정을 진행하였다. 전암대자율은 각 부재별로 10회에 걸쳐 측정하였으며, 측정결과를 정리하여 그래프로 나타냈다. 대자율은 암석이 갖는 다양한 주요 물성 중 외부 자기장에 대한 자화강도를 의미하며 $I=K \cdot H$ 로 정의된다^[7]. 여기서 I는 자화강도(magnetization intensity)를 의미하고 H는 자기장(magnetic field)이며, K는 대자율(magnetic susceptibility)이다. 대자율 값은 진공에서 0이며, 일반적인 화강암의 평균 대자율 값은 $2.512 (\times 10^{-3} \text{ SI unit 이하단위생략})$ 로 대자율 값이 1.256을 기준으로 이보다 높으면 자철석계열로, 낮으면 티탄철석 계열로 구분한다^[8]. 측정 결과, 귀부의 대자율은 0.028~0.050의 분포를 보이며, 평균 0.036의 비교적 낮은 대자율 값으로 나타났다. 비신의 대자율은 0.015~0.051의 범위로 평균 0.027의 대자율 값으로 나타났다. 이수는 0.019~0.052의 분포를 나타내며 평균 0.035의 낮은 대자율 값을 보였다^[54]. 귀부는 측정값에 대해 큰 차이를 보이고 있지 않으며, 평균 대자율 값이 1.256 보다 낮아 티탄철석 계열의 암석에 속하는 것임을 지시한다.

표 1. 전암대자율 측정 결과($\times 10^{-3}$ SI unit)

No.	부재명	측정 횟수(회)	최소	최대	평균
1	이수	10	0.019	0.052	0.035
2	비신	10	0.015	0.051	0.027
3	귀부	10	0.028	0.050	0.036



도 4. 홍법국사탑비의 전암대자율 분포

1.3. 암석기재적 특성

홍법국사탑비를 구성하는 각 부재의 재질특성을 파악하기 위해 육안 관찰과 편광현미경을 이용한 박편 관찰을 실시하였다. 이때 이수에 대한 분석은 문화재 특성상 파괴할 수 없기 때문에 시료확보에 어려움이 있어 육안 관찰만 실시하였다.

육안 관찰 결과, 귀부는 회백색의 중립질 내지 조립질의 입자크기를 가지며, 부분적으로 흑운모와 백운모가 관찰되는 복운모 화강암이다(도 5 a). 비신은 담홍색을 띠고 암회색이 혼재되어 나타나는 중립질 입자크기의 석회암이며, 우백질과 우흑질 부분이 교호되어 보인다. 일부에서는 거정질의 장석이 수반되고 유색광물의 군집이 엽리형태로 관찰된다(도 5 b). 이수는 전체적으로 회백색의 결정질 석회암으로 중립질의 입자크기

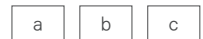
를 보인다. 일부에서는 미세 줄무늬가 발달한 산출 특징을 보인다(도5 c).

보다 정밀한 암석 및 광물학적 특징을 파악하기 위해 편광현미경을 이용한 박편 관찰을 실시하였다. 귀부의 주요 구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모가 관찰되며, 구성광물의 입도는 중립질의 입자크기를 보인다. 부구성광물로 백운모가 관찰된다. 석영은 반자형 또는 타형으로 1~2mm의 입자크기를 보이며, 파동소광 내지 직소광을 보인다. 알칼리장석은 대부분 퍼사이트질로 0.5~1.5mm의 입자크기이며, 사장석은 1.5~2mm이하로 알바이트쌍정이 특징적으로 관찰된다(도6 a, b).

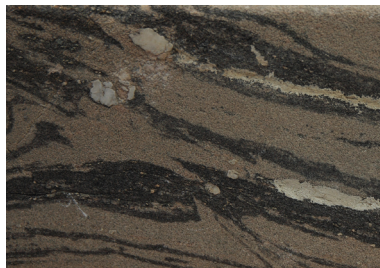
비신의 주요 구성광물은 대부분 반자형 또는 타형의 방해석이 관찰되며, 부구성광물로는 황색 또는 녹색의 유색광물과 미량의 석영입자가 관찰된다. 방해석은 화려한 간섭색을 보이는 모자이크 조직이 특징적으로 관찰되며, 대부분 1~2mm 입자크기를 가진다. 미량으로 분포하는 석영은 파동소광을 보이며, 방해석 입자경계면을 따라 변질되어 나타난다(도6 c, d).

홍법국사탑비의 각 부재별 구성광물에 대한 정확한 동정을 위해 수습한 일부 시료를 대상으로 X-선 회절분석을 진행하였다. 분석시료의 구분을 위해 귀부의 시료명은 TB-01, 비신의 시료명은 SB-01로 명명하였다. 분석 결과, 귀부에서는 석영, 사장석, 알칼리장석이 주로 검출되었으며, 이외에 일부에서 운모가 동정되었다. 비신의 분석 결과에서는 주로 방해석이 동정되었으며, 특징적으로 일부 피크에서는 장석과 석영이 검출되었다. 각각의 X-선 회절분석 결과는 편광현미경을 이용한 박편 관찰 결과와 동일한 광물조성을 보였다(도7).

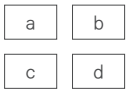
결과적으로 홍법국사탑비의 귀부는 알칼리 장석 화강암 계열인 복운모 화강암이며, 비신과 이수는 주로 석회질 암석이 가지는 탄산염광물들로 이루어져 있어 대리암으로 해석된다. 또한 앞서 실시한 전암대자율 측정 결과에 따라 비신과 이수는 귀부의 복운모 화강암의 대자율 측정값과 비슷한 분포를 보이고 있으나, 육안 관찰과 박편 관찰을 통해 전반적인 암상 및 구성광물을 비교해 볼 때, 귀부는 비신 및 이수와 상이한 암종임을 알 수 있다.



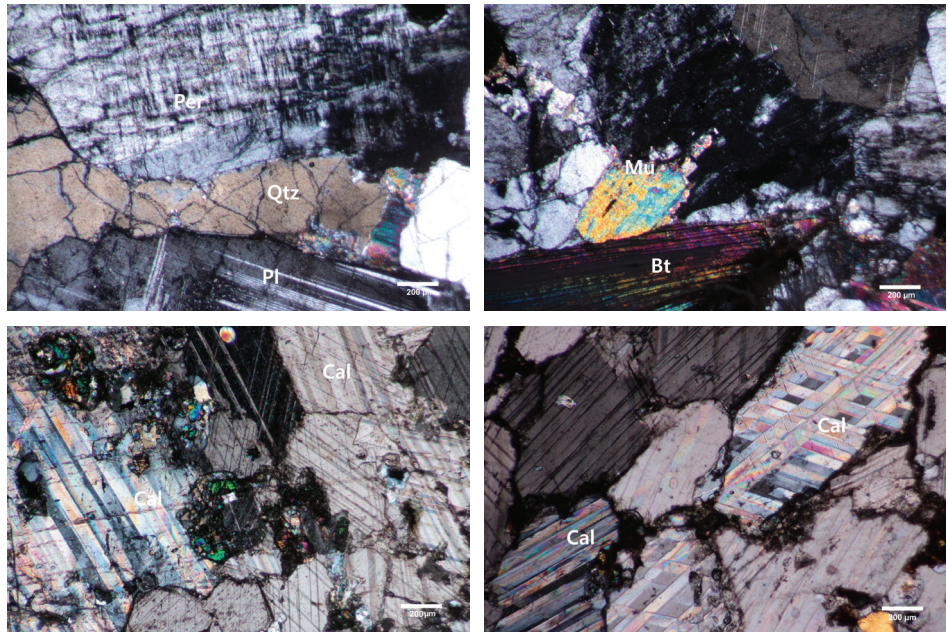
(a) 귀부
(b) 비신
(c) 이수



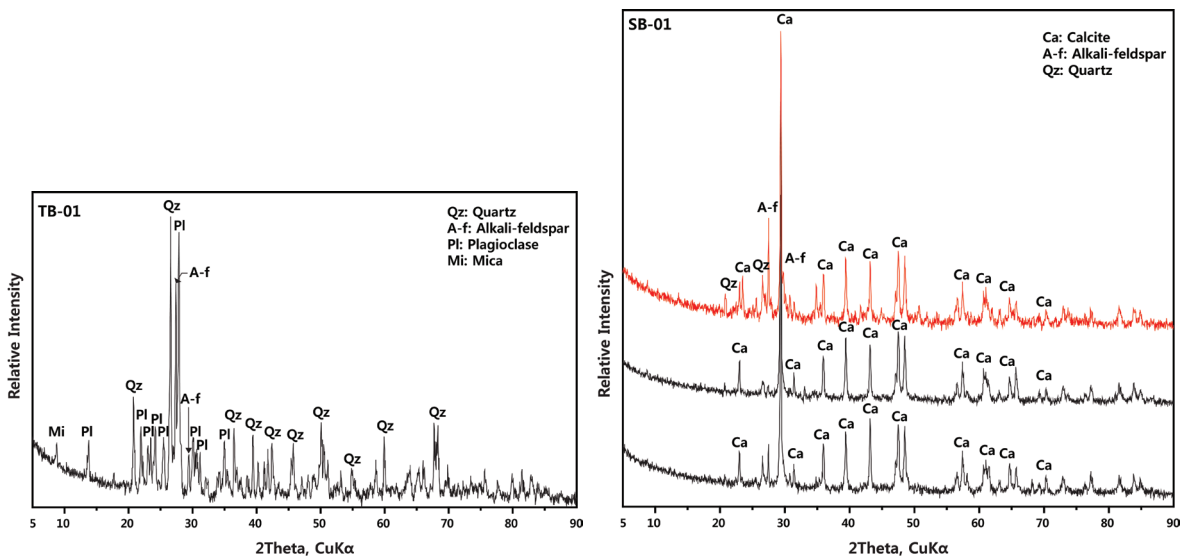
도5. 홍법국사탑비의 표면상태



(a, b) 귀부
(c, d) 비신



도6. 홍법국사탑비의 박편 사진(Qtz:석영, Pl:사장석, Per: 피싸이트, Bt:흑운모, Mu: 백운모, Cal:방해석)



도7. 홍법국사탑비 귀부 및 이수 X-선 회절분석 결과

2. 비파괴 손상도 진단

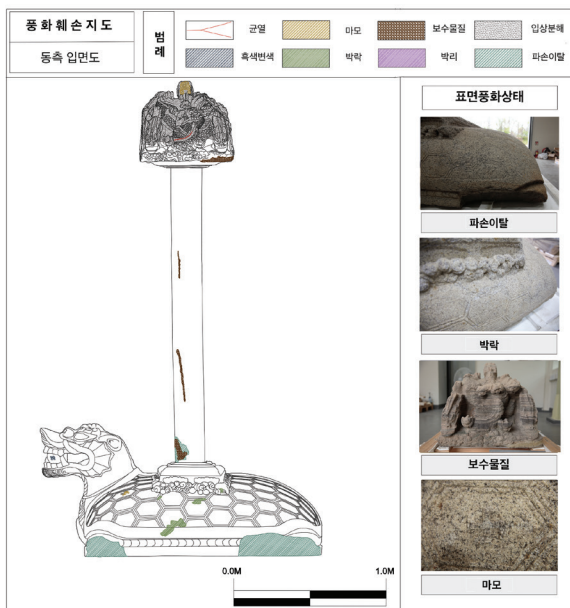
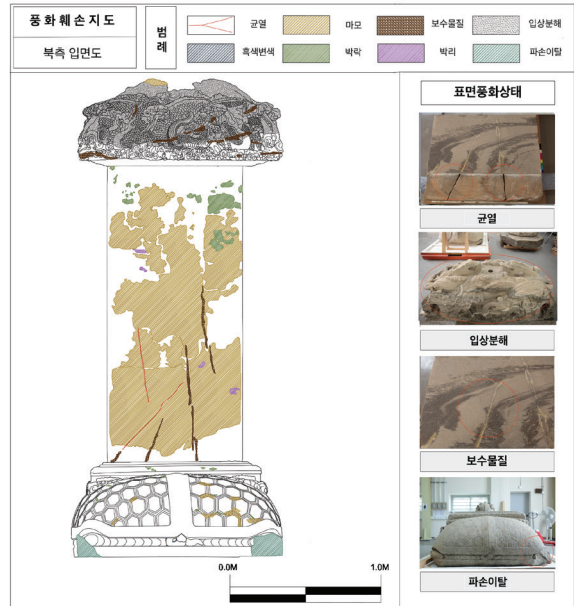
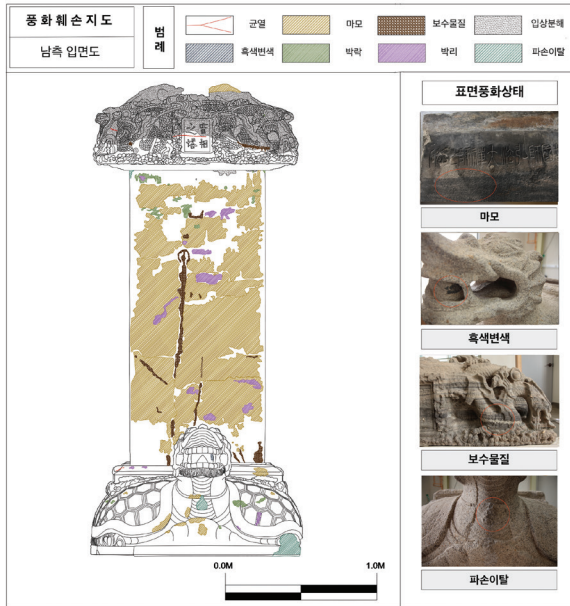
2.1. 풍화훼손도

홍법국사탑비에서 나타나는 손상유형을 정량화하기 위해 육안 관찰을 실시하여 풍화훼손지도를 작성하고 풍화유형별 점유율을 산출하였다.

남측면 관찰 결과, 이수는 전반적으로 입상분해가 확인되었으며 비신에 새겨진 글자는 대부분 마모되어 박리 및 박락을 동반한다. 귀부에서는 파손이탈이 각 모서리에서 다수 관찰되었다. 북측면 관찰 결과, 이수에서는 전체적으로 입상분해 현상을 보이고 있었으며 기존 보존처리에 의한 보수물질이 확인되었다. 비신의 표면은 대부분 마모되고, 균열은 대부분 수직방향으로 발달한 모습을 보이고 있다. 동측면 관찰 결과, 이수는 대부분 입상분해와 마모로 인한 훼손이 두드러지게 나타나며 귀부의 좌우 하단에서는 파손이탈이 관찰되었다. 비신에서는 하단부에서 보수물질이 사선형태로 관찰되었다. 서측면 관찰 결과, 이수에서는 대부분 입상분해로 인한 물리적 풍화가 관찰되었고 귀부에서는 박락과 마모가 조각 부분을 중심으로 나타났다. 비신에서는 기존 보존처리에 의한 보수물질과 박락이 나타났다.

탑비의 손상유형별 점유율을 살펴보면 마모로 인한 점유율은 19.31%로 이중 남측면이 28.29%로 가장 높은 점유율을 보였다. 입상분해로 인한 훼손은 10.37%로 나타났으며, 이중 북측면이 11.08%로 가장 높은 점유율을 보였다. 흑색변색은 0.03%로 서측면이 상대적으로 높게 산출되었다. 보수물질은 전체 0.66%의 점유율로 나타났으며, 북측면에서 높은 수치를 보였다. 파손이탈은 1.78%로 동측면에서 높은 점유율을 보였다.

결과적으로 홍법국사탑비는 박리 및 박락, 마모, 입상분해 등과 같은 물리적 풍화가 주요 훼손요인으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 귀부의 흑색변색은 표면에 피각상으로 나타나며, 박락을 동반한다. 비신의 마모로 인한 훼손은 대부분 상단부의 비문을 중심으로 나타나며, 박리 및 박락은 귀부와 비신의 결구부를 중심으로 나타났다. 이수는 전반적으로 입상분해에 의해 상당히 풍화된 상태이다. 이는 다른 암석에 비해 상대적으로 풍화에 취약한 대리암의 특성과, 조각을 위한 표면 가공에 따라 차별적 훼손이 발생한 것으로 해석된다. 또한 비신에 비해 크기가 작은 이수가 강수의 유입을 막지 못하고 비신으로 유입되어 표면 풍화가 가속화되었을 것으로 사료된다.



도8. 흥법국사탑비의 풍화훼손지도

표2. 방위별 훼손유형 점유율(단위:%)

훼손 유형	남측면	북측면	동측면	서측면
균열(개수)	3	2	1	-
마모	29.29	27.60	0.26	0.15
박리	1.01	0.13	0.00	0.00
박락	0.49	1.12	0.57	0.61
흑색변색	0.01	0.01	0.03	0.12
입상분해	9.95	11.08	10.36	9.72
파손이탈	0.63	1.04	5.98	1.81
보수물질	0.12	1.04	0.85	0.85

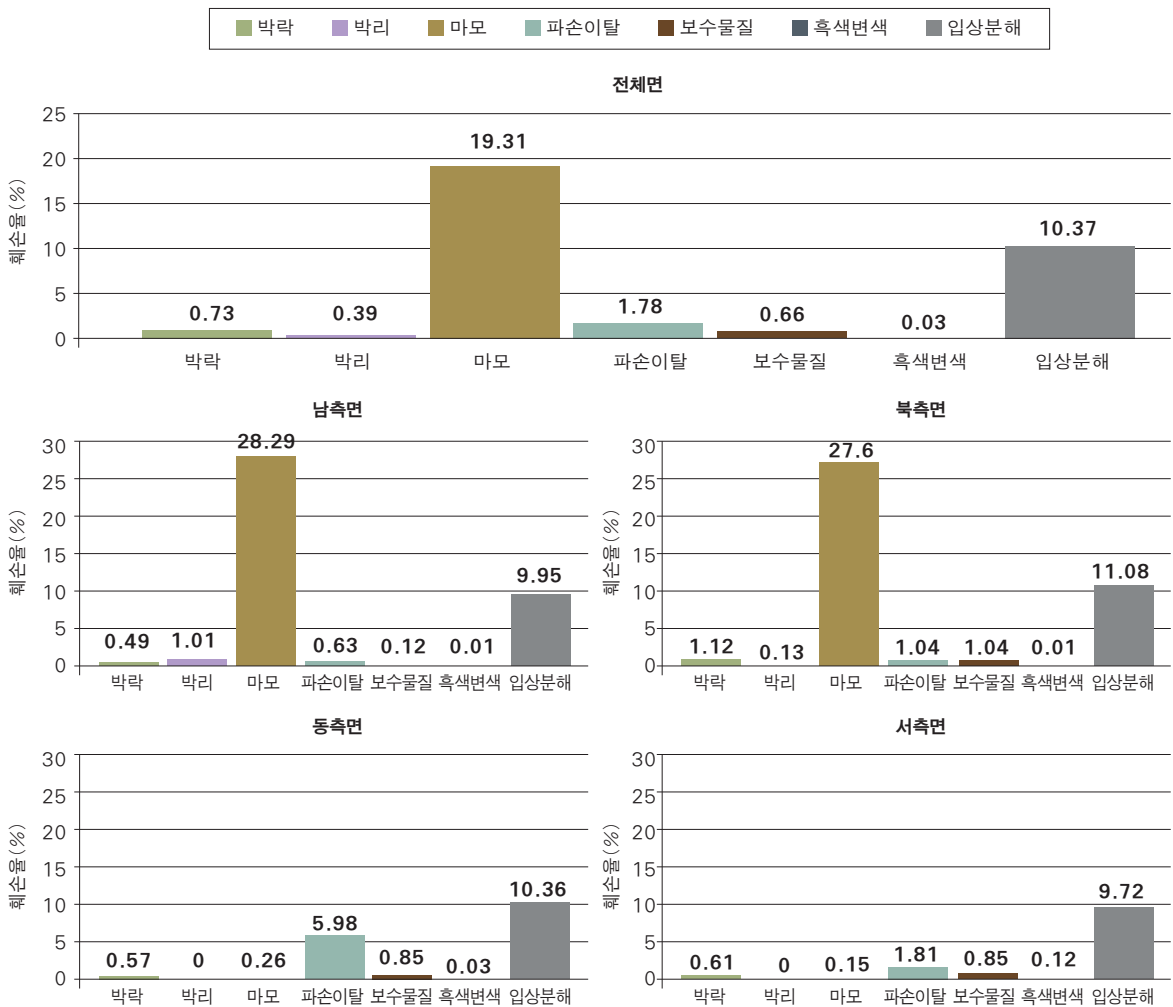


표9. 홍법국사탑비의 손상유형별 점유율 산출 결과

2.2. 초음파 물성진단

홍법국사탑비를 구성하는 부재의 전체적인 풍화도를 파악하기 위해 초음파 물성진단을 실시하였다. 초음파 측정은 간접법을 활용하였으며, 간접법으로 측정할 경우 직접법에 비해 초음파의 주시방향 및 수신감도의 차이로 초음파 속도가 감소하는 것으로 알려져 있어 보정하는 것이 바람직하다⁴⁹⁾. 그러나 이 연구에서는 초음파 속도 결과 값에 대한 보정을 생략하고 측정 결과에 대한 상대적 수치 비교에 중점을 두었다. 측정 방법은 측정 거리가 15cm 미만인 동측면과 서측면을 제외하고 남측면, 북측면에 만 66회씩 총 132 지점을 측정하였다. 측정값의 신뢰도 향상을 위해 동일한 지점을 반복적으로 2~3회 측정하여 평균값을 계산하였다. 측정된 초음파 속도는 풍화훼손지도 작성에 사용된 동일한 도면을 활용하여 등고밀도선 방식으로 도면화시켜 나타내었으며, 암석특성을 고려하여 각 부재를 구분하여 개별적으로 평가하였다.

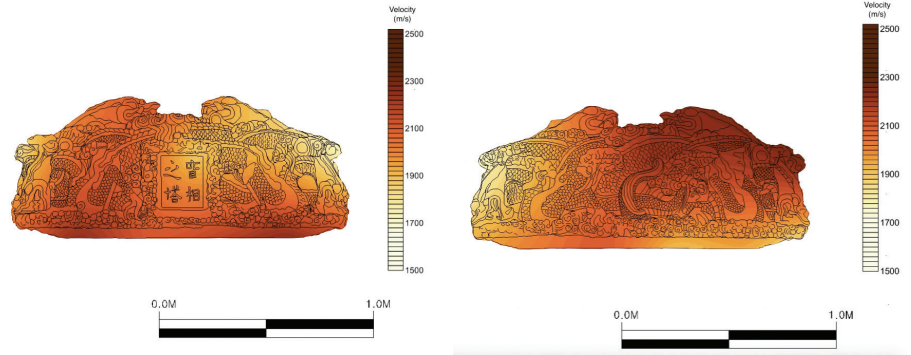
측정 결과 귀부의 전체 초음파 속도 범위는 2,027~2,734m/s(이하 단위생략)의 범위로 평균속도는 2,400으로 나타났다. 방위별로 분석한 결과 귀부의 남측면은 2,027~2,734의 범위로 평균 2,274의 값을 보였으며, 북측면은 2,233~2,724의 범위로 평균 2,542의 값으로 나타났다. 비신의 전체 초음파 속도 범위는 1,410~3,140으로 평균 2,216의 값을 보였다. 남측면은 1,410~2,701의 범위로 평균 1,983으로 나타났으며, 북측면은 2,038~3,140의 범위로 평균 2,449의 값을 보였다. 이수의 전체 초음파 속도는 1,690~2,311의 범위를 보였으며, 평균 2,034로 나타났다. 남측면은 1,690~2,311의 범위로 평균 2,069값을 나타냈으며, 북측면은 1,716~2,284 범위로 평균 1,999의 측정값을 보였다.

특정적으로 귀부에서는 비신의 결구부를 중심으로 낮은 값들이 나타나고 있으며, 이는 부분적으로 나타나는 박리 혹은 미세균열로 인해 약대가 발생한 것으로 판단된다. 비신은 전체적으로 상단에서 낮은 값을 보이고 있으며, 북측면 일부에서 낮은 값들이 보이는 부분은 과거 균열부에 대한 보존처리를 실시하였던 곳으로 세월의 흐름에 따라 다시 약화되어 약대가 발생한 것으로 판단된다.

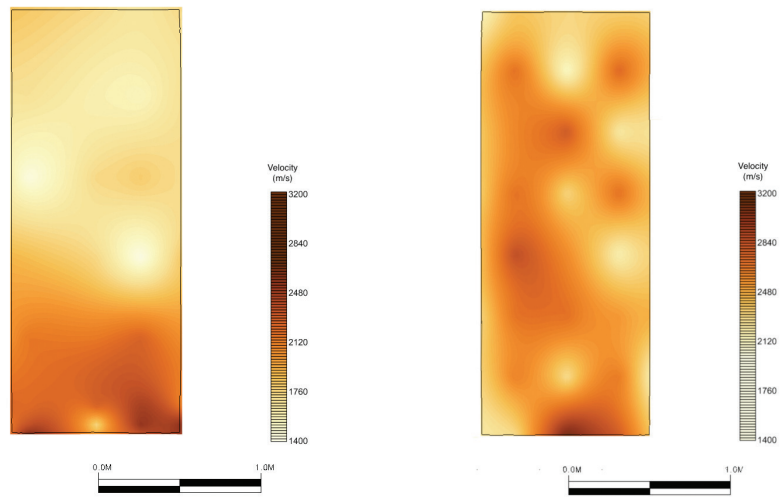
결과적으로 낮은 값을 보이는 부분은 조각을 위한 표면 가공도의 차이와 더불어 부분적으로 나타나는 박리, 박락 및 균열로 인해 발생한 것으로 판단된다. 또한 반복된 부재의 해체 조립 및 이동의 영향으로 인하여 일부 부재의 물성이 약해졌을 것으로 추정된다.

표3. 흥법국사탑비의 각 방위별 초음파속도 측정 결과

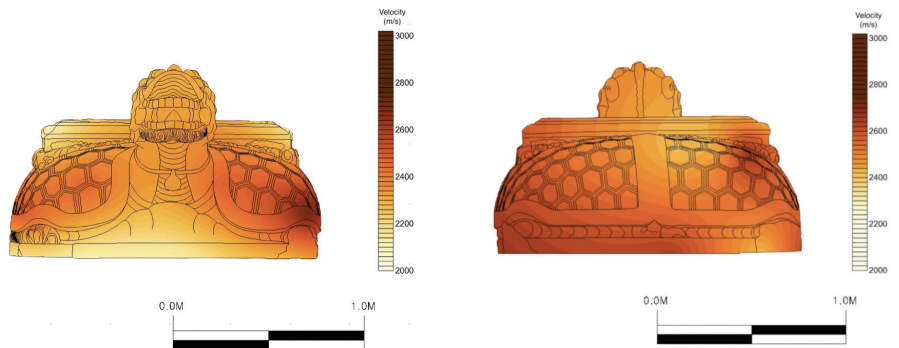
방위	측정 지점	속도(%)	측정 지점	속도(%)	방위	측정 지점	속도(%)	측정 지점	속도(%)
남 측 면	1	2027	34	2045	북 측 면	1	2681	34	2357
	2	2033	35	1910		2	2640	35	2296
	3	2072	36	1880		3	2651	36	2690
	4	2193	37	1750		4	2415	37	2325
	5	2310	38	1410		5	2724	38	2702
	6	2509	39	1850		6	2602	39	2411
	7	2470	40	1630		7	2512	40	2330
	8	2348	41	1430		8	2416	41	2609
	9	2485	42	1750		9	2448	42	2805
	10	2734	43	1810		10	2679	43	2233
	11	2105	44	1731		11	2570	44	2238
	12	2315	45	1689		12	2480	45	2350
	13	2070	46	1700		13	2233	46	2699
	14	2165	47	1605		14	2317	47	2115
	15	2167	48	1560		15	2204	48	2740
	16	2701	49	1717		16	2283	49	2429
	17	2165	50	1870		17	3140	50	2060
	18	2246	51	1840		18	2803	51	2390
	19	2429	52	1765		19	2301	52	2320
	20	2124	53	1660		20	2285	53	2348
	21	2362	54	1773		21	2629	54	2306
	22	1724	55	2094		22	2284	55	1975
	23	2543	56	2286		23	2654	56	2031
	24	2636	57	2117		24	2038	57	2110
	25	2241	58	2202		25	2246	58	1875
	26	2219	59	2311		26	2687	59	1938
	27	2270	60	2186		27	2702	60	1725
	28	2466	61	1771		28	2545	61	1716
	29	2070	62	2077		29	2466	62	1919
	30	2030	63	2082		30	2330	63	2045
	31	2163	64	1873		31	2859	64	2204
	32	2151	65	1690		32	2590	65	2284
	33	2261	66	2142		33	2183	66	2175



도10. 홍법국사탑비의 이수의 초음파 속도 2D 모델링 결과



도11. 홍법국사탑비의 비신의 초음파 속도 2D 모델링 결과



도12. 홍법국사탑비의 귀부의 초음파 속도 2D 모델링 결과

V. 보존처리

1. 표면 오염물 세척

홍법국사탑비의 세척은 각 부재별 풍화상태를 고려하여 실시하였으며, 오염물은 무리하게 제거하지 않고 저감에 중점을 두어 진행하였다. 탑비는 수장고에 보관되어 온 상태였기 때문에 표면에 고착된 토양이나 먼지 등으로 인한 오염이 대부분이었다. 이에 1차적으로 치과용 소도구와 죽침 등을 이용하여 각 부재를 대상으로 건식세척을 진행하였다(도13 a). 세척 시 발생하는 부산물 및 분진은 집진기를 사용하여 재오염을 방지하였다.

건식세척 후 잔존하는 오염물은 습식세척을 진행하여 제거하였다. 습식세척은 부드러운 솔과 증류수 분무를 병행하여 진행하였다. 이때 암석 내부공극에 증류수가 잔류하는 것을 최소화 하고자 증류수와 Ethyl Alcohol을 1:1 비율로 혼합한 용액을 사용하였다. 또한 세부적인 조각이 많은 부재는 풍화상태를 고려하여 선택적으로 스팀세척을 진행하였다. 각 부재에 잔존하는 오염물은 최대한 제거가 가능하였지만 일부 부재에서 관찰되는 흑색변색은 제거되지 않았다.



(a) 건식세척
(b) 스팀세척

도13. 홍법국사탑비 세척 과정

2. 표면 강화처리

홍법국사탑비는 앞서 진행한 손상도 진단 결과에 따라 균열과 표면의 박리 현상, 입상분해 등 다양한 기계적 풍화에 의해 약화된 상태이다. 이에 따라 야외 전시 시 외부환경으로 인한 풍화를 억제하고 약화된 석재의 응집력 향상과 수분의 저항성을 높여주기 위해 표면 강화처리를 진행하였다.

강화제는 Wacker사의 OH-100을 사용하였다. 이 강화제는 용매가 없는 작은 에틸 실리케이트(Ethyl silicate)의 높은 함유량을 포함하고 있는 비소수성 보강제로 모세관을 통하여 비교적 높은 침투 효과를 얻을 수 있다. 또한 암석의 공극을 차단하지 않

음으로써 에틸 실리케이트와 대기 습도로부터 수분 및 모세관 공극의 반응을 촉진시키는 성질을 가지며 풍화와 훼손이 심하다고 판단되는 석조물에 적용할 수 있다고 알려져 있다¹⁰⁾. 표면 강화처리는 탑비의 야외 조립 전과 야외 조립 후 총 2회에 걸쳐 실시하였다.

강화처리는 주로 압축분무기를 이용하여 표면에 분무하였으며, 부재의 형태에 따라 강화제가 고일 수 있는 부분은 양모brush를 사용하여 도포하였다. 또한 앞서 실시한 초음파 물성진단 결과에 따라 상대적으로 낮은 값을 보이는 부재는 추가로 도포하였다. 도포 이후 약 7일 간 자연건조 하였다. 2차 도포는 야외 조립이 완료 된 후에 실시하였으며, 1차 도포와 동일한 방법으로 진행하였다.



도14. 부재 표면 강화처리 과정



도15. 흥법국사탑비 야외 조립 완료

VI. 고찰 및 결론

이 연구에서는 충주 정토사지 홍법국사탑비를 대상으로 각각의 부재에 대한 재질특성 규명과 손상도 진단을 실시하여 기초자료를 제시하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

홍법국사탑비의 귀부에 대한 전암대자율 측정값은 $0.028\sim0.050(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 범위로 나타났으며, 비신은 $0.015\sim0.051(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 분포를 보였다. 이수는 $0.019\sim0.052(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 의 대자율 값 범위를 보였으며, 각각의 부재는 공통적으로 $1.0(\times 10^{-3} \text{ SI unit})$ 이하의 낮은 자화강도를 보였다. 귀부의 측정값에 대한 범위는 큰 차이를 보이고 있지 않으며, 평균 대자율 값이 1.256 보다 낮아 티탄철석 계열의 암석에 속하는 것임을 지시한다.

홍법국사탑비의 재질 특성을 파악하기 위해 육안 관찰과 박편 관찰을 실시한 결과, 귀부는 회백색을 띠는 중립질 내지 조립질의 입자크기를 가지는 화강암으로 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모로 이루어진 복운모 화강암으로 판단된다. 비신은 담홍색을 띠고 부분적으로 암회색이 혼재되어 나타나는 중립질의 결정질 석회암으로 일부에서 거정질의 장석이 수반되며 미량의 석영이 확인되었다. 이수는 회백색을 띠는 중립질 입자크기를 가지는 결정질 석회암으로 판단된다.

X-선 회절분석 결과, 귀부는 석영, 사장석, 알칼리장석이 주로 분석되었고, 일부에서 운모가 동정되었다. 비신의 분석 결과에서는 주로 방해석이 동정되었으며, 특징적으로 장석과 석영이 동정되었다. 각 시료의 분석 결과는 육안 관찰 및 편광현미경 관찰을 통해 확인되는 구성광물과 동일한 결과를 나타냈다. 또한 대자율 값은 각 부재마다 비슷한 분포를 보이거나 육안 관찰과 박편 관찰, X-선 회절분석을 통해 전체적인 암상 및 조암광물을 비교해 볼 때, 귀부에 사용된 암석은 비신 및 이수와 상이한 암종임을 알 수 있었다.

홍법국사탑비는 풍화훼손지도를 통해 박리, 박락, 마모, 입상분해 등과 같은 물리적 풍화가 주요 훼손요인으로 나타났다. 비신은 마모로 인한 훼손이 두드러지게 나타났으며, 대부분 상단부의 비문을 중심으로 박리 및 박락을 동반하였다. 귀부는 비신의 결구부를 중심으로 박리, 박락이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이수는 전반적으로 입상분해에 의해 상당히 풍화된 상태였다. 이는 다른 암석에 비해 상대적으로 풍화에 취약한 대리암의 특성과, 조각을 위한 표면 가공 정도에 따라 각 부재마다 차별적으로 훼손이 발생한 것으로 해석된다.

초음파 물성진단을 통해 탑비의 전체적인 풍화도를 파악한 결과 이수과 비신의 상단에서 초음파 속도 값이 상대적으로 낮게 측정됨을 알 수 있었다. 이를 바탕으로

탑비의 야외 전시에 앞서 표면 오염물 제거와 표면 강화처리를 실시하여 풍화를 억제하고 현 상태를 최대한 보존하고자 하였다.

이 연구를 통해 홍법국사탑비의 보존을 위한 기초자료를 확보할 수 있는 좋은 계기가 되었다. 또한 석조문화재의 보존처리는 풍화를 영구적으로 저지하는 것이 아니기 때문에 장기적 모니터링을 통해 주기적인 보존관리가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 양희정 · 황현성, 忠州 淨土寺 弘法國師 實相塔과 塔碑의 移轉 建立 經過와 相輪部 部材의 保存科學的 調査, 美術資料 제90호, p143, (2016).
2. 김송이, 고려시대 탑비연구, 이화여자대학교 대학원, 석사학위논문, p78, (2005).
3. 이순자, 일제강점기 고적조사사업 연구, 숙명여자대학교 대학원, 박사학위논문, p215, (2007).
4. 김기환, 박봉순, 이흥규, 제천 지질도폭 설명서, p7, 국립지질조사소, 대전, (1967).
5. 김기환 외, 앞의 책, p8.
6. 김기환 외, 앞의 책, p10.
7. Sharma, P.V, Geophysical methods in geology, in *Methods in geochemistry and geophysics*, Elsevier, vol.12, p428, (1976).
8. Ishihara, S, *Granitoid series and mineralization in the circum-pacific Phanerozoic granite belts*, Resource Geology, vol.48, p219-224, (1998).
9. 국립문화재연구소, 비파괴 기술을 활용한 석조문화재 보존관리, p23, 대전, (2014).
10. 조연태, 풍화된 석재문화재의 강화제 처리 후 물성 변화에 관한 연구, 용인대학교 예술대학원, 석사학위 논문, p7, (2003).