

# 비파괴 분석을 이용한 화강암류 석조 문화재의 부재특성과 산지추정: 거둔사 원공국사 승묘탑과 천수사 오층석탑을 중심으로

Non-destructive Analysis  
of Material Characteristics  
and Provenance of Granite  
Monuments:

*The Cases of Stupa for National  
Preceptor Wongong at Geodonsa  
Temple and Five-story Pagoda at  
Cheonsusa Temple*

김용휘<sup>1</sup>, 최선규<sup>1\*</sup>, 서지은<sup>2</sup>, 강정극<sup>1</sup>,

이종현<sup>1</sup>, 조연태<sup>3</sup>

고려대학교 지구환경과학과<sup>1</sup>,

경북대학교 지질학과<sup>2</sup>

국립중앙박물관 보존과학부<sup>3</sup>

Kim Yonghui<sup>1</sup>, Choi Seongyu<sup>1\*</sup>,  
Seo Jieun<sup>2</sup>, Kang Jeonggeuk<sup>1</sup>,  
Lee Jonghyun<sup>1</sup>, Jo Yeontae<sup>3</sup>

Department of Earth and Environmental  
Sciences, Korea University<sup>1</sup>,  
Department of Geology, School of Earth System  
Sciences, Kyungpook National University<sup>2</sup>,  
Conservation Science Division, National  
Museum of Korea<sup>3</sup>

\* Corresponding Author:  
Choi Seongyu

Tel: 82-2-3290-3174  
E-mail: seongyu@korea.ac.kr

## 요약

국내의 석조문화재는 대부분 화강암류가 부재로 사용되었으며, 이러한 화강암류 부재는 전국적으로 광범위하게 분포하고 있다. 석조문화재의 원산지 추정을 위하여 강원지역의 거둔사 원공국사 승묘탑과 천수사 오층석탑을 중심으로 산상, 물성, 광물상 및 화학조성 자료를 종합적으로 적용하였으며, 석조문화재의 소재지와 인접한 지역인 원주 화강암 특성과 비교하였다. 거둔사 원공국사 승묘탑은 단일 부재의 복운모 화강암으로 구분되었으며, 천수사 오층석탑은 복운모 화강암과 흑운모 화강암 두 부재로 구분된다. 해당 석조문화재의 산상 및 자화강도는 원주 화강암 특성과 전반적으로 일치하며, 향후 석조문화재의 복원 과정에서 유사한 부재 선택은 소재지와 인접한 화강암체의 현지 조사를 병행하여 수행할 필요가 있다고 사료된다.

**주제어 :** 석조문화재, 화강암류, 대자율, X선-형광분석, VNIR-SWIR 분광분석

## Abstract

Most stone monuments in Korea are made from the granitoids found extensively throughout the nation. To identify the provenance of the stone materials, this study carried out comprehensive analyses of the occurrence, physical properties, mineralogy, and chemical composition of *Stupa for National Preceptor Wongong* at Geodonsa Temple and *Five-story Pagoda* at Cheonsusa Temple, both located in the Gangwon region. Their features were compared with those of granite from Wonju City near the sites of the two monuments. *Stupa for National Preceptor Wongong* is composed purely of two-mica granite, whereas *Five-story Pagoda* was made from both two-mica and biotite granites. The occurrence and magnetic susceptibility of the two granite monuments generally coincide with those of granite from Wonju. When selecting materials for the restoration of stone monuments, it is deemed necessary to carry out a field survey on granite in areas adjacent to the locations of the stone monuments subject to restoration.

**Keywords :** Stone monuments, Granites, Magnetic susceptibility, X-ray fluorescent analysis, VNIR-SWIR spectroscopy

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

## I. 서언

국내의 석조문화재는 대부분 화강암류가 부재로 사용되었으며, 이러한 화강암류 부재는 전국적으로 광범위하게 분포하고 있다. 대부분의 석조문화재는 오래된 축조시기와 옥외에 설치되어 물리적인 훼손과 화학적인 풍화작용이 상당히 진행되어 있어 석조문화재를 구성하는 암석과 동질의 석재를 확보하기 위한 연구 필요성이 제기되고 있다. 국내에 분포하는 암석은 대부분 1/50,000 지질도로 제시되어 있으며, 석조문화재 부재에 대한 원산지 추정을 위한 암석·지화학적 연구는 아직 미진한 형편이다. 국내 화강암류는 전반적으로 유사한 화학조성을 보이고 있어 지화학적 분석치만을 비교하여 산지를 추정하기에는 어려움이 내재되어 있다. 석조문화재의 원산지 추정을 위하여 산상, 물성, 광물상 및 화학조성과 같은 자료를 종합적으로 비교하여 석조 부재에 대한 다각적인 해석이 필요하며, 기존 문헌에서 제시된 지역별 화강암류의 산상, 광물학적·지화학적 특성을 종합적으로 비교 검토할 필요가 있다.

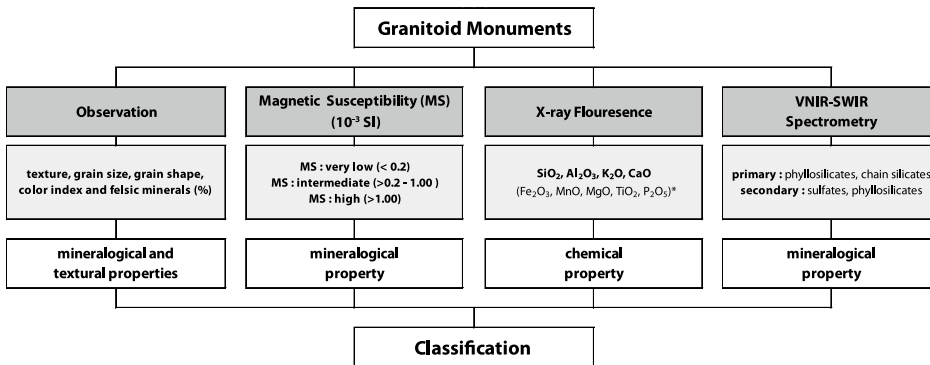
석조문화재 부재로 사용된 암석 분석은 일반적으로 편광현미경 관찰과 함께 X선 회절(XRD)분석, X선-형광(XRF)분석, 에너지 분산형 분광분석(SEM-EDS)에서 확인된 화학조성 및 광물분석 자료를 근거로 하고 있으나, 이러한 기기분석법은 공통적으로 전처리 과정과 파쇄 과정이 요구되는 방법들이다.

중앙박물관에 전시된 석조문화재는 대부분 국보나 보물로 지정되어 시료 채취가 불가능하기 때문에 부재에 대한 육안 관찰과 병행하여 휴대용 분석기에 의한 전암대자율(MS), 전암 X선-형광(XRF)분석, 가시-근적외선 단파장 적외선 분광분석(VNIR-SWIR)을 비파괴로 실시하여 광물 및 화학분석을 수행하여 산상, 물성, 일차 광물상 및 화학 조성을 검토하였다. 또한 석조문화재 부재는 이차광물의 유형 및 존재 유무를 통하여 화학적 풍화상태를 종합적으로 검토하였다. 석조문화재는 정량자료를 통하여 동일한 암석 부재(단일 석재) 또는 두 종류 이상 암석 부재(복합 석재)의 사용 여부를 비교 검토하였다.

본 연구에서는 석조문화재의 부재에 대한 조직, 물성, 화학조성 및 광물상의 종합적인 분석 자료를 기준으로 암석유형을 구분하고, 석조문화재 소재지의 기 발표된 한국석재도감(2007)에서 제시된 암석사진과 비교하였다. 1/50,000 지질도에서 석조문화재의 부재와 일차적으로 유사한 암석 유무를 확인하고, 유사한 암석으로 추정된 지역에서 암석을 채취·분석하여 암석 재질의 동질성 유무를 평가하였다<sup>[1]</sup>.

## II. 연구방법

석조문화재 부재는 육안 및 확대 사진을 통하여 암석의 산상(조직, 입도 및 포획 암 유무)을 관찰하고 색지수 분석(유색광물의 함유비(부피 %))을 통하여 암석 유형을 구분하였으며, 비파괴 분석에서는 휴대용 분석기기를 이용하여 전암대자율(MS), 전암 X선-형광(XRF)분석 및 가시-근적외선 단파장 적외선 분광분석(VNIR-SWIR)을 실시하였다(도1). 이 연구에서는 암석 분류에 중요한 자료인 전암대자율의 자화강도(화강암류의 티탄철석 계열 또는 자철석 계열), 주요 화학조성( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ), 일차 함수광물상(층상규산염 및 복쇄상규산염 광물) 및 이차 풍화광물상(황산염 및 층상규산염 광물)을 확인하였다.



도1. 화강암류 암석 분류를 위한 비파괴분석 특성 비교도

### 1. 육안 관찰 및 암상 분류

석조문화재 부재는 육안 관찰 시 암석 조직을 기준으로 일차적으로 화성암, 퇴적암, 변성암의 암상 유형을 구분하였고, 화성암류는 확대 사진에서 유색광물의 함유비(부피 %)와 입도에 따라 세분하였다. 육안 관찰에서는 색지수(완우백질, 우백질, 중색질, 우흑질, 초고철질), 입도(세립질, 중립질, 조립질), 결정형태(자형, 반자형, 타형), 주요 구성광물(부피 %), 조직(등립질, 반상, 엽리상, 문상, 정동, 포획암), 풍화도(박리, 균열)를 중심으로 기재하였다. 유색광물의 함유비(부피 %)는 색지수표를 기준으로 비교 검토하였고, 규장질 광물은 색상 기준으로 투명 석영, 담홍색~유백색 정장석, 백색~담회색 사장석으로 구분하여 양적관계를 제시하였다.

### 2. 전암대자율(MS) 분석

석조문화재 부재는 일차적으로 육안관찰과 함께 전암대자율의 자화강도( $10^{-3}$  SI)

를 적용하여 동일한 암석 부재의 사용 유무를 확인하였다. 암석 유형에 따른 자화강도 연구는 오래전부터 다양하게 제시되었다<sup>[2]</sup>. 백운모를 포함한 S형 화강암은 낮은 대자율을 보이는데 반해, 흑운모 화강암 또는 각섬석-흑운모 화강암과 같은 I형 화강암의 경우 상대적으로 높은 대자율 값을 보인다. 이는 광물과 자화강도의 상관관계를 비교한 연구와도 일치하며, 백운모에서 흑운모, 각섬석과 같은 유색광물의 함량이 증가됨에 따라 대자율 값도 선형으로 증가하는 경향성을 보였다<sup>[3]</sup>.

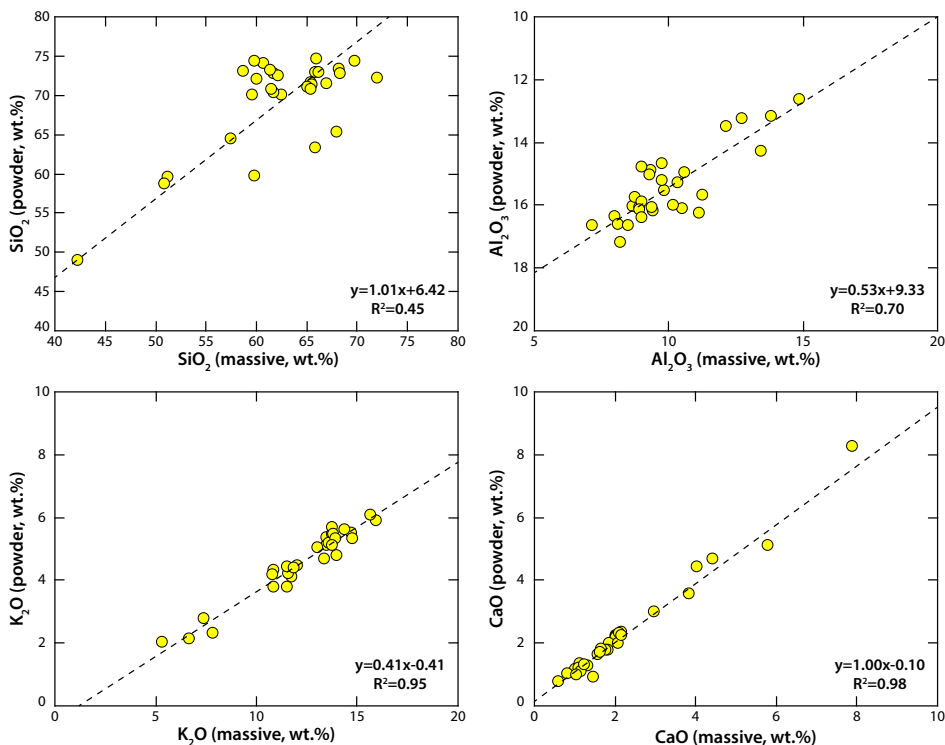
전암대자율의 분석기기는 Terraplus사에서 제작된 KT-10 Plus S/C meter를 사용하였다. 해당 기기의 분석영역은 직경 6.5cm이며,  $1 \times 10^{-6}$  SI의 감도로 약 3초 내외의 측정시간이 소요된다. 전암대자율은 석조문화재의 현장 측정이 용이하여 가능한 전체 석재를 대상으로 실시하였고, 육안으로 불균질한 부재 또는 동일한 부재의 색상 차이를 보이는 위치에서 고르게 측정하였다. 석조문화재 부재의 자화강도 기준은  $<0.2 \times 10^{-3}$  SI와  $0.2-1 \times 10^{-3}$  SI 및  $>1 \times 10^{-3}$  SI의 세 단계로 구분하여 부재별 유사성 관계를 검토하였다.

### 3. X선-형광(XRF) 분석

휴대용 X선-형광분석 기기는 Olympus사의 Innov-X DELTA-50이며, 분석영역의 범위는 직경 약 2cm정도이다. 측정시간은 10kV에서 30초, 50kV에서 60초, 총 90초가 소요된다. XRF분석은 육안 관찰과 자화강도를 통하여 확인된 동일 위치에서 측정하였으며, 화성암의 입도에 따른 불균질성을 최소화하기 위하여 7회 이상 측정치의 평균값을 적용하였다. 해당 분석기기는 석조 부재에 단순히 접촉한 상태에서 실시간 분석이 가능하고 전처리 과정 없이 사용할 수 있으나, 비파괴 분석방법이 갖는 불균질성과 정확도에 대한 문제점을 보완할 필요가 있다.

휴대용 XRF 분석기기는 Na나 Mg와 같은 경원소와 미량성분의 정량 분석이 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 전암 분석치의 주성분 원소들 중 일정 함량을 포함하는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  성분을 기준으로 화강암류 유형을 세분화하였다. 분석 정확도를 높이기 위하여 휴대용 전암분석 기기의 측정치와 기존의 분말 상태로 분석된 전암 분석치를 비교하였다. 기존의 전암분석은 캐나다 Actlabs에서 실시되었으며, Panalytical Axios Advanced Wavelength Dispersive XRF 장비를 이용하여 분말 상태의 화강암류를 분석하였다. 휴대용 전암분석은 분말 시료의 잔여 시편을 이용하였으며, 최대한 균질한 분석치를 얻기 위하여 7회 측정 후 최대치와 최소치를 제외한 평균값을 사용하였다. 총 30개의 화강암류 암석을 대상으로 해당 주성분 원소 함량의 상관관계를 검토하고, 검량선을 이용하여 보정된 조성치를 화성암 분류에 적용하였다<sup>(도2)</sup>.  $\text{SiO}_2$ 는 가

장 낮은 상관관계를 보였으며, 이는 휴대용 기기에 대한 분석오차 및 시료 불균질성에 의한 오차로 해석된다. 휴대용 전암분석으로부터 측정된  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{K}_2\text{O}$  성분은 0.70과 0.95의 상관관계를 보였으며,  $\text{CaO}$ 는 0.98의 가장 높은 상관관계를 보였다. 본 연구에서는 휴대용 분석기기의 정확도를 높이기 위해 해당 검량선을 적용하여 측정치를 보정한 값을 사용하였다.



도2. 휴대용 전암분석치와 Actlabs 전암분석치의 상관관계( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ )

#### 4. 가시-근적외선 단파장 적외선(VNIR-SWIR) 분광분석

가시-근적외선 단파장 적외선 분광분석은 전암대자율과 전암분석이 수행된 동일한 부재의 위치에서 실시하였으며, 일차 함수규산염광물상 및 이차 풍화광물상의 존재 유무를 검토하였다. 화강암류 내 일차 함수규산염광물상은 백운모 및 흑운모와 같은 층상 규산염 광물과 각섬석과 같은 복쇄상 규산염 광물이 있으며, 이차 풍화광물상으로는 석고와 같은 황산염 광물과 고령석, 일라이트와 같은 층상 규산염 광물이 있다.

가시-근적외선 단파장 적외선 분광분석에 사용된 휴대용 분석기기는 ASD사 TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer(이하 TerraSpec-4)이며, 분석영역의 범위

는 직경 약 2cm정도이다. TerraSpec-4는 가시-근적외선 영역(350~1,300nm)과 단파장적외선 영역(1,300~2,500nm)에서 3~6nm의 분광해상도를 갖는 다목적 분광분석기이다. TerraSpec-4는 기본적으로 측정 모듈로 Contact Probe가 제공되며, 추가적으로 Muglight로 분광분석을 수행할 수 있다. 두 측정 모듈의 작동 원리는 동일하며, Contact Probe는 현장에서 암석 표면에 직접 접촉한 상태에서 측정하도록 고안된 장치이며, Muglight는 암석 또는 분말상태 시료를 측정하도록 고안된 장치이다.

가시-근적외선 단파장 적외선 분광기는 규산염광물의 팔면체 구조에서 Al-OH, Mg-OH, Fe-OH 결합 및  $H_2O$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$  작용기에 의한 흡수 현상을 통하여 광물상과 조성 차이를 추정하고 있다<sup>[4]</sup>. 이러한 분광분석법은 박편 제작 및 암석 분쇄의 전처리 과정 없이 현장에서 초당 10개의 스펙트럼 획득이 가능한 분석방법으로 휴대용 분광분석 장비가 보급됨에 따라 다양한 함수광물 분석에 활용되고 있다.

### III. 적용사례

#### 1. 거둔사 원공국사 승묘탑

거둔사 원공국사 승묘탑(보물 제190호)은 육안 관찰 결과, 한 종류의 우백질 화강암류 부재를 사용하였다. 기단부, 탑신부 및 상륜부의 화강암류는 회백색과 담홍색을 띠고, 구성광물의 입도는 전반적으로 1~2mm의 중립질 조직을 보인다. 주 구성광물(부피 %)은 석영 30~35, 정장석 30~35, 사장석 15~20, 흑운모 8~9 및 백운모 <1로 구성되며, 유색광물의 색지수는 약 8정도이다<sup>(표3)</sup>. 흑운모는 약 0.5~1.0cm 크기의 침상 결정으로 관찰되며, 간혹 흑운모가 집합체로 관찰된다. 석영 또는 장석 반정이 흑운모와 함께 관찰되며, 산화된 황철석이 적갈색을 띠며 미립으로 관찰된다.

거둔사 원공국사 승묘탑 부재에서 부재 위치별 총 32회 암석의 자화강도를 측정하였고, 대자율 균질성을 파악한 결과, 위치별 대자율의 자화강도( $10^{-3}$  SI)는 상륜부에서 0.00~0.02(평균치; 0.01), 탑신부에서 0.00~0.02(평균치; 0.02) 및 기단부에서 0.00~0.02(평균치; 0.01)로 확인되어 한 종류의 부재 사용을 시사한다<sup>(표4)</sup>. 또한 수장고에 보관 중인 거둔사 부재는 0.01의 대자율 평균치를 보였다. 대자율 측정결과를 요약하면 거둔사 원공국사 승묘탑 및 수장고 부재는 전반적으로 0.00~0.02(평균치; 0.01)의 낮은 대자율을 갖는 전형적인 티탄철석 계열의 특징을 보이며, 동일한 유형의 화강암류를 부재로 사용하였다<sup>(표1)</sup>.

총 22회 휴대용 X선-형광분석 결과를 요약하면 낮은 자화강도를 갖는 암석의

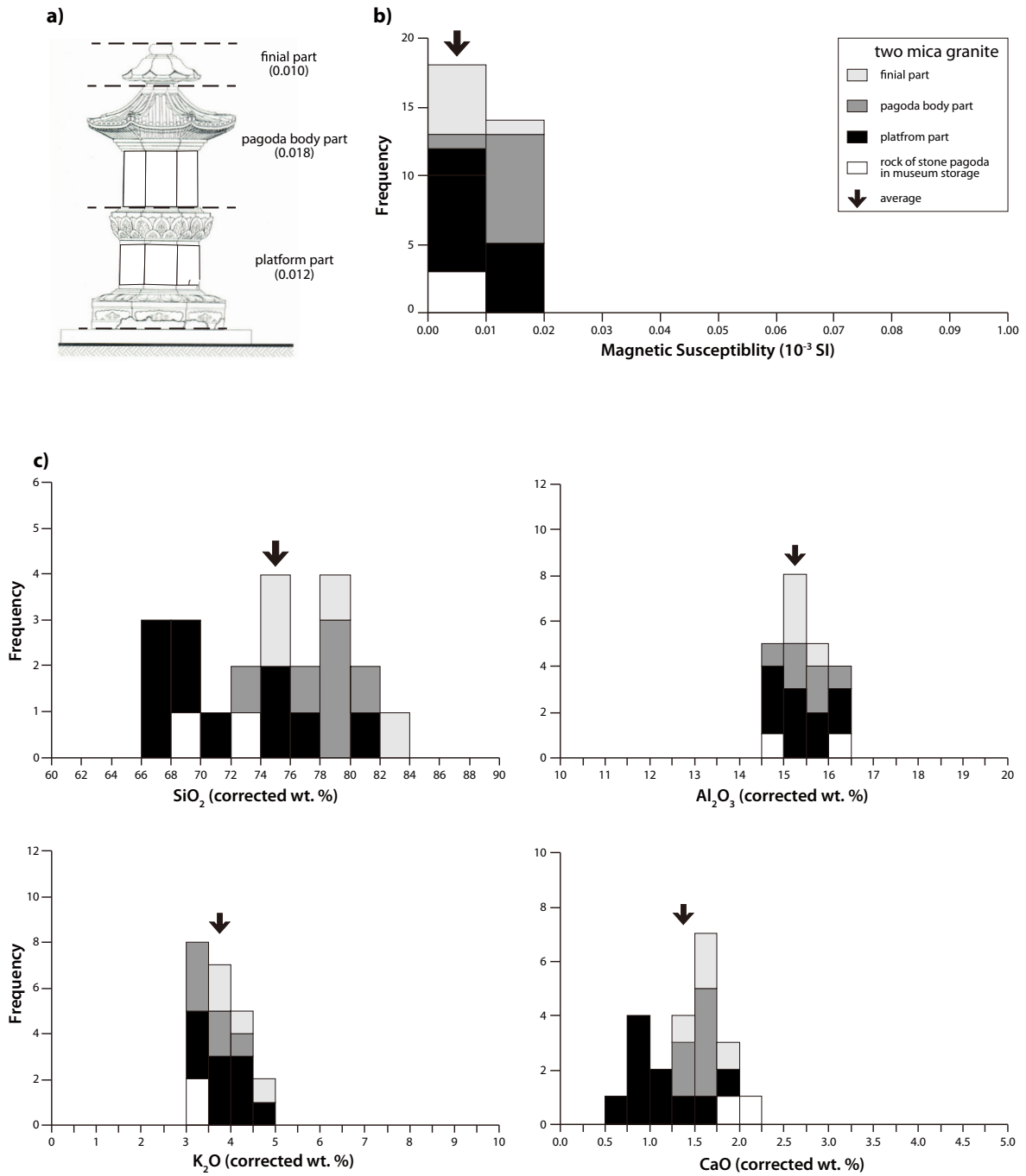


$\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  함량(중량 %)은 상륜부(보정 평균치; 78.2, 15.4, 4.2, 1.6), 탑신부(보정 평균치; 78.2, 15.4, 3.6, 1.5), 기단부(보정 평균치; 72.0, 15.4, 3.9, 1.1) 및 수장고(보정 평균치; 70.9, 15.7, 3.3, 1.9)에서 보정 평균치 75.1, 15.4, 3.9, 1.3으로써 전형적인 화강암 조성과 일치한다(표1, 도4c).

대자율과 화학조성을 종합적으로 비교한 결과, 거둔사 원공국사 승묘탑 부재인 화강암은 전반적으로 유사한 특성을 보이고 있다(도5). 대자율은 0.00-0.02의 좁은 범위를 보이며,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  함량(중량 %)은 보정치 70.9-78.2, 15.4-15.7, 3.3-4.2, 1.1-1.9으로써 모든 부재가 화강암 영역에 해당된다. 또한, 모든 부재는 고-칼륨 칼크-알칼리 계열로 서로 유사한 암석학적 특징을 보이며, 약 7 중량%의 변화 양상을 보이는  $\text{SiO}_2$  함량은 휴대용 분석기기의 좁은 분석영역과 중립질 부재가 갖는 대상 석재의 불균질성 및 휴대용 분석기기의 분석오차로 해석된다. 거둔사 원공국사 승묘탑은 육안관찰, 대자율 및 화학조성을 종합적으로 요약하면 해당 부재는 화강암 석재를 단일 부재로 사용하였다(도5).



도3. (a) 거둔사 원공국사 승묘탑의 암석 산출상태. (b) 거둔사 부재. (c) 중립질 조직과 약 8의 색지수인 복운모 화강암. (d) 흑운모로 둘러싸인 약 0.5~1cm의 석영 또는 장석반정



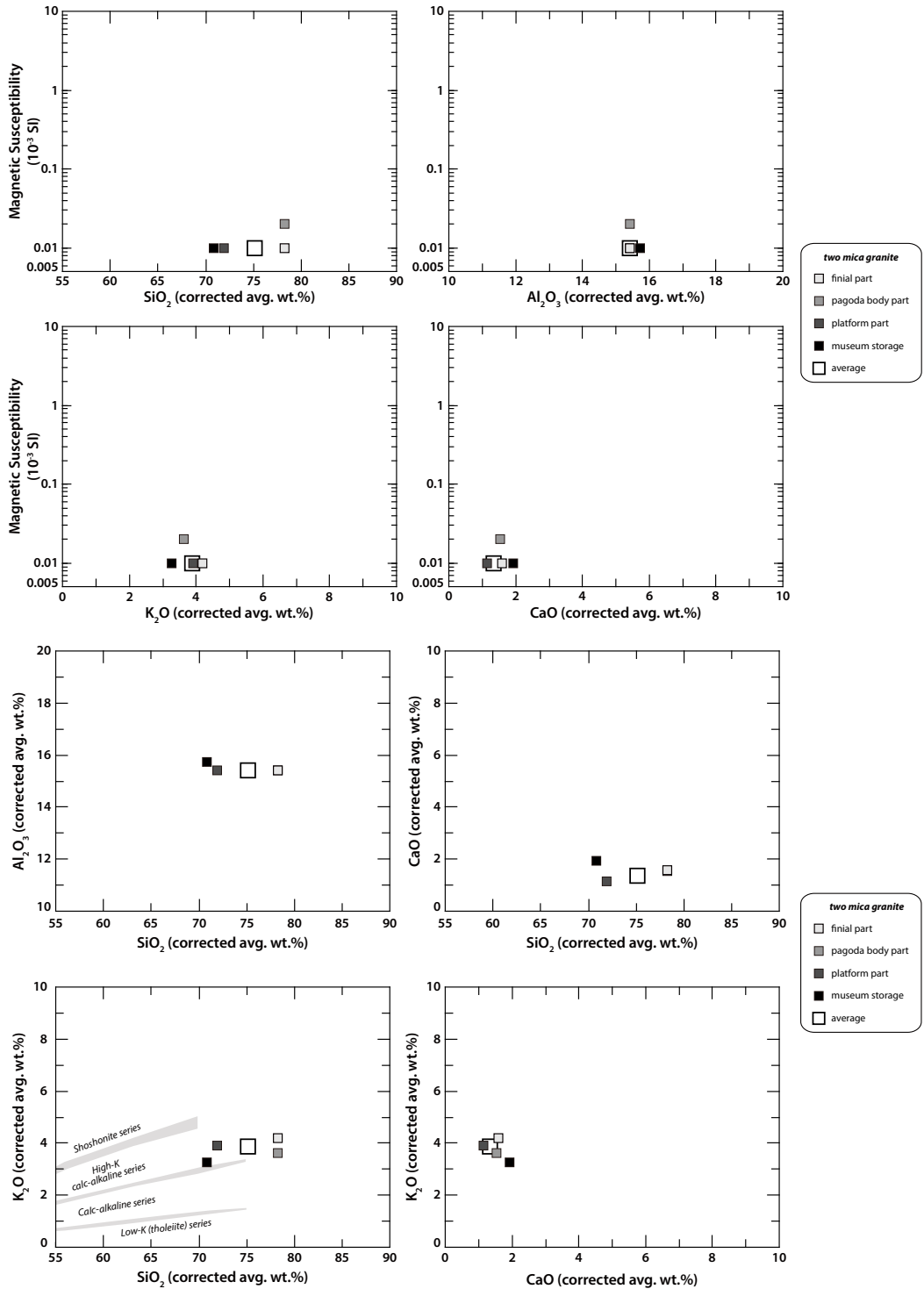
도4. (a) 거둔사 원공국사 승묘탑의 부재별 자화강도 평균. (b) 거둔사 원공국사 승묘탑 및 수장고 부재에 대한 대자율 분포도. (c) 전암분석 분포도 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ )



표 1. 두 석조문화재의 육안관찰, 대자율 및 화학조성 결과

| Designation                          | Granitoids       | Grain size | Texture     | Color index | Analysis of location                 | Magnetic susceptibility (10 <sup>-3</sup> SI) |           |      |         | Chemical composition (corrected wt.%) |                  |      |         |                                |      |         |                  |      |         |         |      | National Museum of Korea (2005) |                           |
|--------------------------------------|------------------|------------|-------------|-------------|--------------------------------------|---|-----------|------|---------|---------------------------------------|------------------|------|---------|--------------------------------|------|---------|------------------|------|---------|---------|------|---------------------------------|---------------------------|
|                                      |                  |            |             |             |                                      | n   | range     | S.D. | average | n                                     | SiO <sub>2</sub> |      |         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |      |         | K <sub>2</sub> O |      |         | CaO     |      |                                 |                           |
|                                      |                  |            |             |             |                                      |   |           |      |         |                                       | range            | S.D. | average | range                          | S.D. | average | range            | S.D. | average | range   | S.D. |                                 | average                   |
| Stupa for National Preceptor Wongong | two mica granite | medium     | granular    | 8           | final part                           | 6   | 0.00-0.02 | 0.01 | 0.01    | 4                                     | 74.3-82.8        | 3.3  | 78.2    | 15.2-15.7                      | 0.2  | 15.4    | 3.8-4.7          | 0.4  | 4.2     | 1.4-1.8 | 0.1  | 1.6                             | biotite-amphibole granite |
|                                      |                  |            |             |             | pagoda body part                     | 9   | 0.00-0.02 | 0.01 | 0.02    | 6                                     | 73.0-81.9        | 2.8  | 78.2    | 15.0-16.0                      | 0.4  | 15.4    | 3.3-4.1          | 0.3  | 3.6     | 1.3-1.7 | 0.2  | 1.5                             |                           |
|                                      |                  |            |             |             | platform part                        | 14  | 0.00-0.02 | 0.01 | 0.01    | 10                                    | 67.7-80.8        | 4.2  | 72.0    | 14.5-16.3                      | 0.6  | 15.4    | 3.1-4.5          | 0.5  | 3.9     | 0.8-1.9 | 0.4  | 1.1                             |                           |
|                                      |                  |            |             |             | museum storage                       | 3   | 0.01      | 0.01 | 0.01    | 2                                     | 68.5-73.2        | 2.4  | 70.9    | 15.0-16.5                      | 0.7  | 15.7    | 3.2-3.3          | 0.0  | 3.3     | 1.8-2.0 | 0.1  | 1.9                             |                           |
|                                      |                  |            |             |             | total average                        | 32  | 0.00-0.02 | 0.01 | 0.01    | 22                                    | 67.7-82.8        | 4.8  | 75.1    | 14.5-16.5                      | 0.5  | 15.4    | 3.1-4.7          | 0.5  | 3.9     | 0.8-2.0 | 0.4  | 1.3                             |                           |
| Five-story pagoda                    | two mica granite | medium     | porphyritic | 15          | 3 <sup>rd</sup> story of pagoda body | 2   | 0.02-0.03 | 0.00 | 0.02    | 2                                     | 77.0-80.2        | 1.6  | 78.6    | 13.5-14.8                      | 0.7  | 14.2    | 0.8-2.8          | 1.0  | 1.8     | 2.5-2.7 | 0.1  | 2.6                             | amphibole granite         |
|                                      |                  |            |             |             | 2 <sup>nd</sup> story of main stone  | 5   | 0.05-0.08 | 0.02 | 0.05    | 0                                     | -                | -    | -       | -                              | -    | -       | -                | -    | -       | -       | -    |                                 |                           |
|                                      |                  |            |             |             | 1 <sup>st</sup> story of main stone  | 7   | 0.03-0.08 | 0.02 | 0.05    | 4                                     | 70.9-83.2        | 4.8  | 78.5    | 12.8-15.1                      | 1.0  | 13.9    | 1.1-4.1          | 1.1  | 2.9     | 1.5-3.4 | 0.8  | 2.0                             |                           |
|                                      |                  |            |             |             | platform part                        | 16  | 0.02-0.33 | 0.09 | 0.09    | 5                                     | 67.1-79.9        | 4.4  | 73.1    | 13.7-16.2                      | 0.8  | 14.9    | 0.9-2.4          | 0.6  | 1.7     | 2.3-4.0 | 0.8  | 3.0                             |                           |
|                                      |                  |            |             |             | total average                        | 30  | 0.02-0.33 | 0.07 | 0.07    | 11                                    | 67.1-83.2        | 5.0  | 76.1    | 12.8-16.2                      | 1.0  | 14.4    | 0.8-4.1          | 1.0  | 2.2     | 1.5-4.0 | 0.8  | 2.6                             |                           |
|                                      | biotite granite  | medium     | porphyritic | 20          | 2 <sup>nd</sup> story of roof stone  | 4   | 0.38-0.52 | 0.05 | 0.46    | 1                                     | 66.6             | 0.0  | 66.6    | 16.4                           | 0.0  | 16.4    | 1.7              | 0.0  | 1.7     | 3.1     | 0.0  | 3.1                             | amphibole granite         |
|                                      |                  |            |             |             | 1 <sup>st</sup> story of roof stone  | 7   | 0.37-0.55 | 0.06 | 0.45    | 4                                     | 67.8-79.6        | 4.6  | 73.6    | 14.7-16.9                      | 0.9  | 15.3    | 2.0-4.1          | 0.8  | 3.2     | 1.6-3.6 | 0.8  | 2.7                             |                           |
|                                      |                  |            |             |             | total average                        | 11  | 0.37-0.55 | 0.06 | 0.45    | 5                                     | 66.6-79.6        | 5.0  | 72.2    | 14.7-16.9                      | 0.9  | 15.5    | 1.7-4.1          | 0.9  | 2.9     | 1.6-3.6 | 0.7  | 2.8                             |                           |

n=number of analyses; S. D.= Standard deviation



도5. 거둔사 원공국사 승묘탑의 부재별 대자율-화학조성 및 화학조성 간 분포도

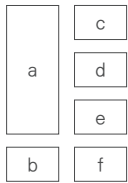
## 2. 천수사 오층석탑

천수사 오층석탑은 육안 관찰 결과, 두 종류의 화강암류 부재를 복합적으로 사용하였다. 기단부, 1층 탑신석, 2층 탑신석 및 3층 탑신의 화강암류는 주로 백색~유백색을 띠며, 구성광물의 입도는 전반적으로 2~5mm의 중립질, 반상 조직을 보인다. 주 구성광물(부피 %)은 석영 30-35, 정장석 30-35, 사장석 30-35, 흑운모 13-15 및 백운모 <3로 구성되며, 유색광물의 색지수는 약 15정도이다. 사장석은 간혹 최대 약 5×2cm 크기의 자형 반정으로 관찰되며, 장석 내에 누대를 따라 고철질 포유물 군집대가 관찰된다(56). 1층 옥개석과 2층 옥개석의 화강암류는 담회색을 띠고, 구성광물의 입도는 전반적으로 1~3mm의 중립질 및 반상조직을 보인다. 주 구성광물(부피 %)은 석영 30, 정장석 25, 사장석 35, 흑운모 18, 각섬석 <2로 구성되며, 유색광물의 색지수는 약 20정도이다. 약 1~5cm 크기의 흑운모와 각섬석 등의 우흑질 고철질 포획암이 관찰되며, 부분적으로 약 0.5~1cm의 침상 흑운모가 관찰된다. 장석들은 주황빛을 띠며, 고철질 포획암내에 존재하는 황철석은 산화되어 적갈색을 띤다.

천수사 오층석탑에서 부재 위치별 총 47회 암석의 자화강도를 측정하였고, 대자율 균질성을 파악한 결과, 두 종류의 부재가 사용되었다(57 a). 위치별 대자율의 자화강도( $10^{-3}$  SI)는 3층 탑신에서 0.02-0.03(평균치; 0.02), 2층 옥개석에서 0.38-0.52(평균치; 0.46), 2층 탑신석에서 0.05-0.08(평균치; 0.05), 1층 옥개석에서 0.37-0.55(평균치; 0.45), 1층 탑신석에서 0.03-0.08(평균치; 0.05) 및 기단부에서 0.02-0.33(평균치; 0.09)로 확인되었다(57 b). 또한 1층 옥개석과 1층 탑신석 내 포획암의 대자율은 각각 0.51-0.83(평균치; 0.65)와 0.30으로 해당 위치보다 비교적 높은 자화강도를 보였다. 기단부에서 복원에 사용된 석재의 대자율은 3.72-5.16(평균치 4.44)로 앞의 부재들과 상이한 차이를 확인하였다(57 b). 대자율 측정결과를 요약하면 3층 탑신, 2층 탑신석, 1층 탑신석 및 기단부는 0.02-0.33(평균치; 0.07)의 낮은 대자율을 갖는 티탄철석 계열의 특징을 보이며, 포획암은 0.30의 대자율을 나타내고 있다. 한편 2층 옥개석과 1층 옥개석의 대자율은 상대적으로 높은 0.37-0.83(평균치; 0.45)의 상이한 대자율 값을 갖는 자철석 계열에 근접한 특징을 보이고 있으며, 포획암도 이와 유사한 0.51-0.83(평균치; 0.65)의 대자율을 나타내고 있다(58). 이를 통해 천수사 오층석탑은 자화강도의 차이를 보이는 두 종류의 화강암류가 사용되었음을 시사하고 있다.

총 18회 휴대용 X선-형광분석 결과를 요약하면 낮은 자화강도를 갖는 암석은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO 함량(중량 %)이 3층 탑신(보정 평균치; 78.6, 14.2, 1.8, 2.6), 1층 탑신석(보정 평균치; 78.5, 13.9, 2.9, 2.0) 및 기단부(보정 평균치; 73.1, 14.9, 1.7, 3.0)에서 보정 평균치 76.1, 14.4, 2.2, 2.6으로써 화강암에 해당된다(57 c). 한편, 높은 자화강도를 갖는 암석은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO 함량이 2층 옥개석(보정 평균치; 66.6,

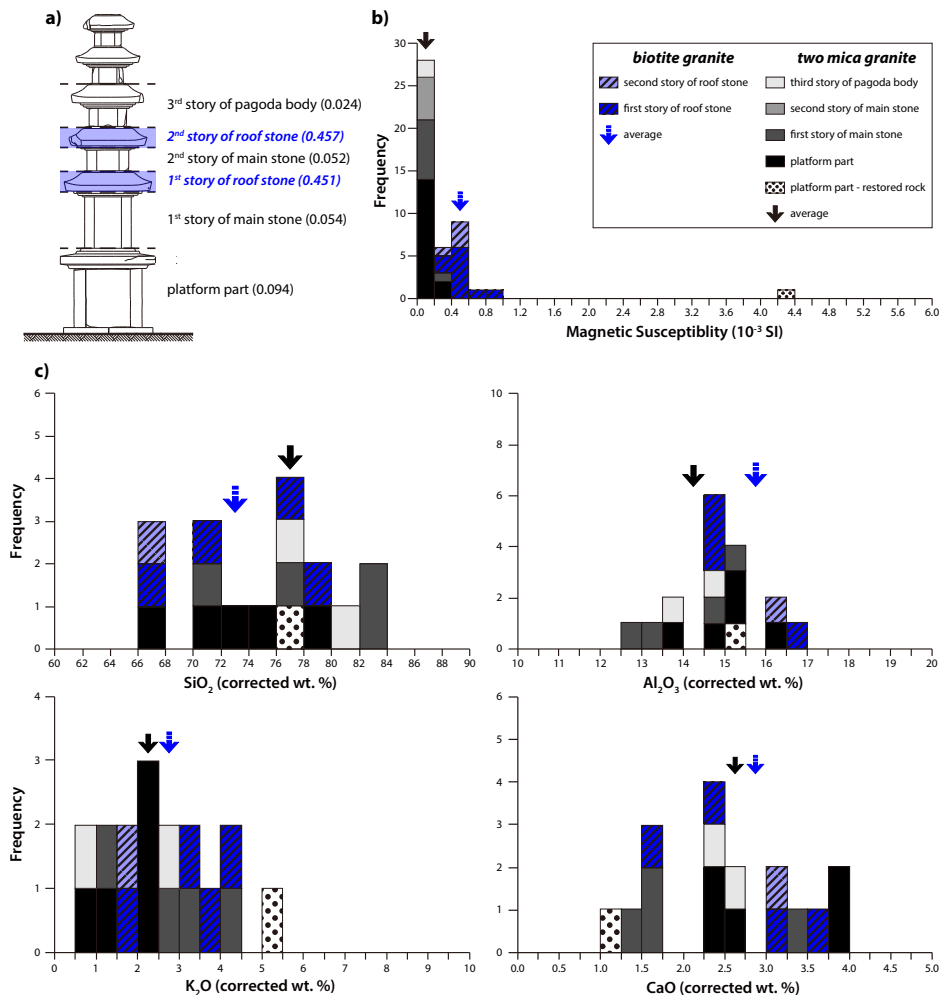
16.4, 1.7, 3.2) 및 1층 옥개석(보정 평균치: 73.6, 15.3, 3.2, 2.7)에서 보정 평균치 72.2, 15.5, 2.9, 2.8로써 화강암에 해당되며, 복원 암석은 보정 평균치가 각각 76.6, 15.3, 5.1, 1.2로써 마찬가지로 화강암에 해당된다(표1, 도7 c).



도6. (a) 천수사 오층석탑의 암석 산출상태. (b) 1~3mm의 중립질, 반상 조직인 약 20의 색지수의 복운모 화강암. (c) 2~5mm의 중립질, 반상 조직의 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모로 구성된 약 15 색지수를 보이는 흑운모 화강암. (d) 중립질, 반상 조직을 보이는 복운모 화강암 내 장석 반정. (e) 복운모 화강암 내 5×2cm의 장석 반정 내 고철질 광물누대. (f) 복원 암석 내 장석 변질

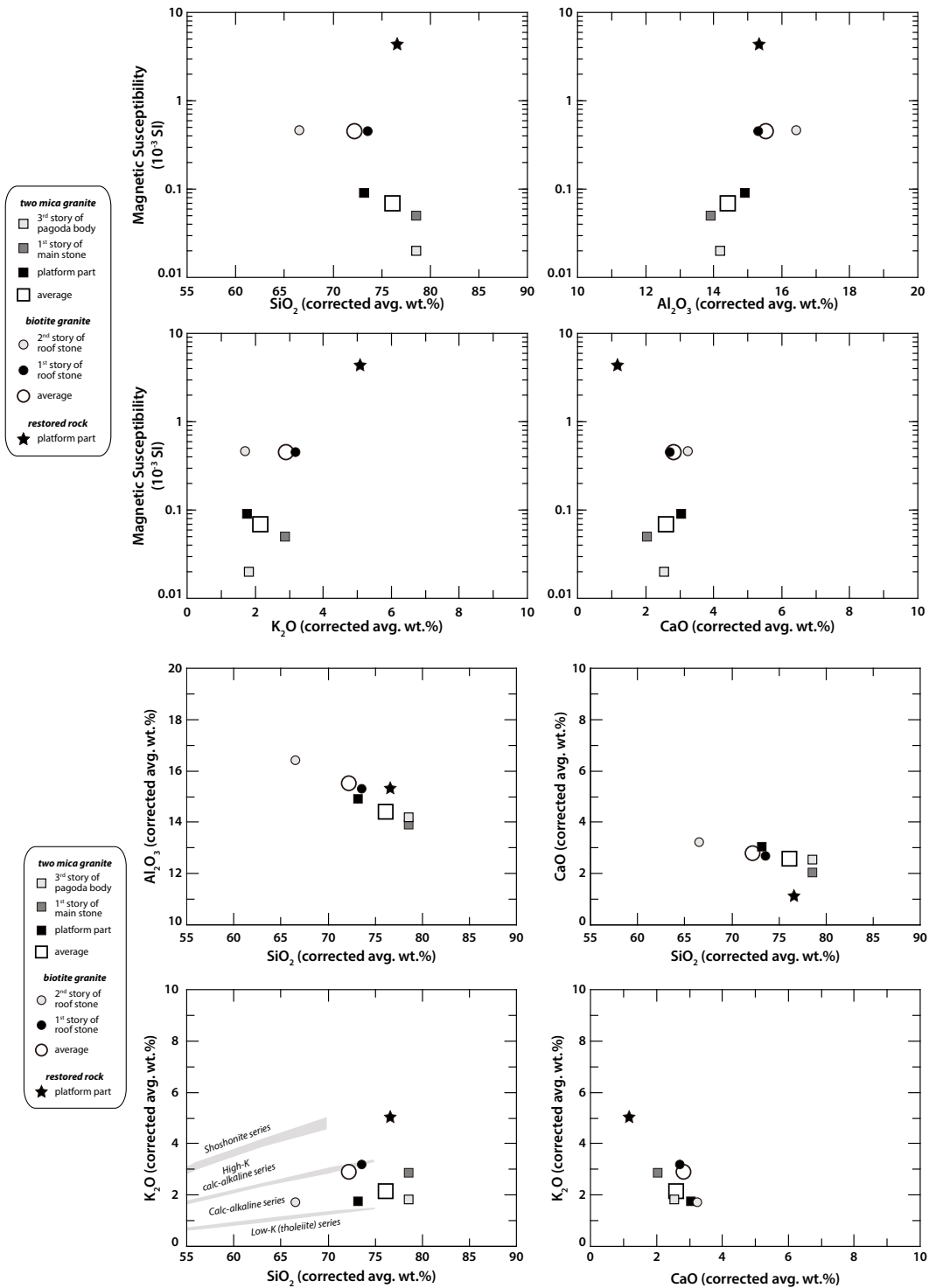
대자율과 화학조성을 종합적으로 비교한 결과, 천수사 오층석탑 내 낮은 자화강도를 갖는 암석은 0.02-0.33의 대자율 범위를 보이고,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  함량(중량

%)은 보정치 73.1-78.6, 13.9-14.9, 1.7-2.9, 2.0-3.0으로써 화강암 영역에 해당된다(도8). 높은 자화강도를 갖는 암석은 0.37-0.83의 대자율 범위를 보이고, 화학조성의 보정치는 66.6-73.6, 15.3-16.4, 1.7-3.2, 2.7-3.2으로써 화강암 영역에 해당된다. 두 종류의 화강암 부재는 모두 칼크-알칼리 계열로 서로 유사한 암석학적 특징을 보이는데 반해, 복원 석재의 경우 동일한 화강암이나 대자율 및 화학조성 모두 앞 부재와 상이한 차이를 보였다(도8). 천수사 오층석탑은 육안관찰, 대자율 및 화학조성을 종합적으로 요약하면 해당 부재는 복합 석재로 구성되었으며, 두 종류의 화강암을 사용하였다. 또한 기단부에서 복원에 사용된 암석은 높은 자화강도를 갖는 자철석 계열의 화강암으로 본 부재와는 상이한 암석으로 사용되었다.



도7. (a) 천수사 오층석탑의 부재별 자화강도 평균. (b) 천수사 오층석탑에 대한 대자율 분포도. (c) 전암분석 분포도 (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO)





도8. 천수사 오층석탑의 부재별 대자율-화학조성 및 화학조성 간 분포도



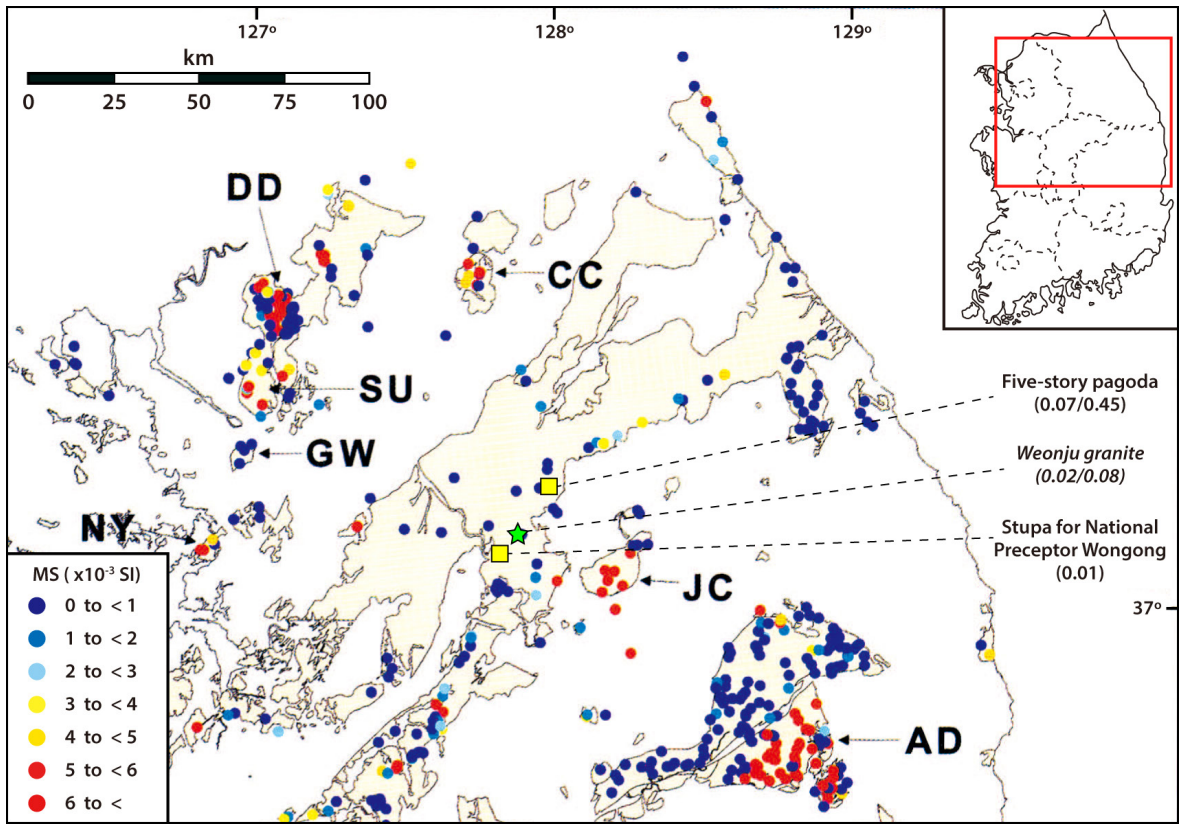
## IV. 원산지 추정

국내의 석조문화재는 대부분 옥외에 위치해 오랜 세월동안 물리적·화학적 풍화작용을 받아왔으며, 근래 들어 산업화로 인한 대기오염 및 산성비에 의한 훼손이 가속화되고 있다. 석조문화재의 원산지를 추정함으로써 부재의 원형 복원 시 유사한 암석 재질의 정보를 제공해 효과적인 복원 방안을 제시할 수 있다. 거둔사 원공국사 승묘탑과 천수사 오층석탑에 사용된 화강암류 부재의 원산지 추정은 주로 화강암류의 산출상태와 함께 비파괴 분석에서 수행된 자화강도, 광물상 및 화학조성을 종합적으로 반영하였고, 1/1,000,000 지질도와 1/50,000 지질도를 체계적으로 비교하여 부재의 유사성을 검토하였다<sup>[5, 6, 7]</sup>.

화강암 부재를 사용한 원산지 추정은 주로 문화재 소재 지역과 인접한 수십 km 이내의 산출지에 대하여 대자율 자화강도의 유사성과 입도를 비교하였다. 화강암류는 남한에서 중생대 송림, 대보, 불국사 화강암류 및 호남 전단대의 염리상 화강암에 대하여 다양한 산출지가 기재되었다<sup>[8, 9]</sup>. 송림 및 대보 화강암류는 전반적으로 조립질~중립질 입상조직을 보이는 반면, 불국사 암체는 반상 조직과 함께 세립질~중립질 입도를 나타내고 있다. 이러한 산출 특징은 기본적으로 화강암질 마그마의 관입 및 정치심도를 반영하고 있어 입도와 함께 조직을 기준으로 지질시대별 화강암류의 산출지역에 따라 개략적으로 추정할 수 있다<sup>[10, 11]</sup>.

최근 남한 중생대 화강암류는 지역별 자화강도(MS) 및 화학조성의 차별성이 개괄적으로 보고되었으며,  $3 \times 10^{-3}$  SI의 자화강도를 기준으로 자철석 계열과 티탄철석 계열로 구분된다<sup>[12, 13, 14]</sup>. 이러한 화강암체의 자화강도는 동일 암체에서도 마그마분화 작용에 따른 광물상 또는 풍화도, 변질정도에 따라 다양한 차이를 보이고 있어 개별 측정치보다는 전체적인 변화 양상에 대한 종합적인 해석이 요구된다. 국내 중생대 화강암류는 기존 논문에서 1 이하( $<1 \times 10^{-3}$  SI)의 자화강도를 갖는 티탄철석 계열 화강암류는 동일한 그룹으로 기재하였으나, 1 이상( $>1 \times 10^{-3}$  SI)의 높은 자화강도를 갖는 화강암류는 6단계로 구분하였다<sup>[5, 9][12]</sup>.

거둔사 원공국사 승묘탑과 천수사 오층석탑에 사용된 화강암류는 일차적으로 입도와 조직 특성에 따라 정치심도가 반영된 대보 화강암류로 구분되며, 석조문화재의 소재지별 화강암류의 입도는 강원도 원주지역을 중심으로 검토하였다. 강원 지역 석조문화재에서는 대부분 조립질~중립질 입도를 갖는 화강암류가 주종을 이루며, 간혹 수 cm크기에 사장석 반정의 반상 조직과 고철질 포획물을 함유한 부재가 활용되었다.



도9. 대보 화강암류에 대한 대자율 자화강도의 분포도(Jin et al., 2001)

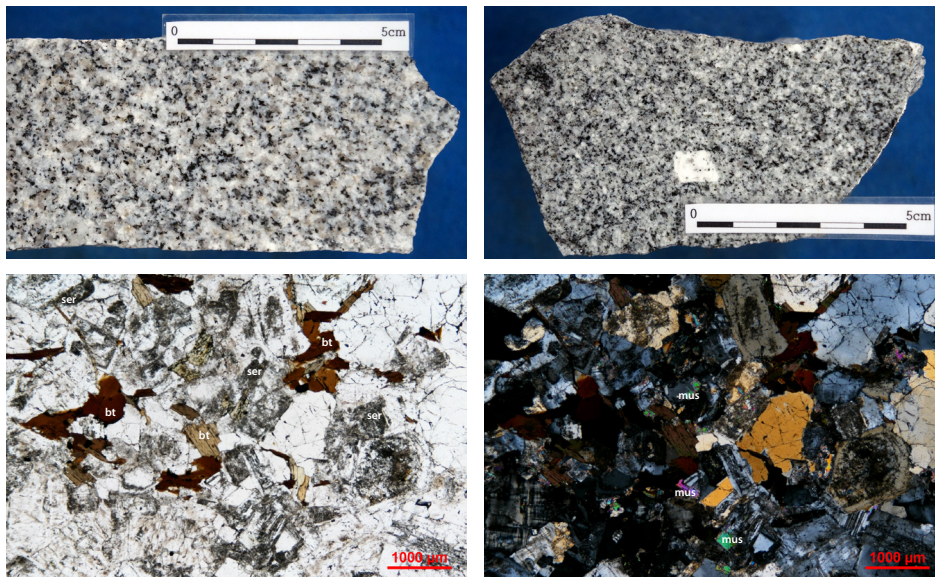
이는 심부에서 정치된 화강암류를 시사하고 있다. 원주 지역에서는 자화강도가 매우 낮은 티탄철석 계열( $<1 \times 10^{-3}$  SI)의 중립질 복운모 화강암 또는 흑운모 화강암을 핵심 부재로 사용하였다. 이러한 경향성은 경기육괴에서 산출되는 대보 화강암류의 자화강도 분포 경향과 전반적으로 일치하고 있다(도9).

측정된 원산지 화강암을 확인하기 위해 두 석조문화재 소재지에서 근접한 경기 개발 및 광옥석재에서 채취한 원주 화강암 시료를 대상으로 비교하였다. 전암분석은 캐나다 Actlabs Ltd.에서 측정하였으며, 분석방법은 1000℃에서 2시간에 걸쳐 디스크로 성형하여, Panalytical Axios Advanced Wavelength Dispersive XRF로 분석되었다. 전암분석 시료는 현미경 관찰을 통해 광물상을 동정하고 암석의 자화강도를 측정하였다.

원주 화강암은 육안 관찰 결과, 백색~유백색을 띠고, 구성광물의 입도는 전반적으로 1~2mm의 중립질, 반상 조직을 보인다. 주 구성광물(부피 %)은 석영 30-35, 정장

석 25-30, 사장석 10-15, 흑운모 10-15 및 백운모 <1로 구성되며, 유색광물의 색지수는 약 10정도이다(도10). 흑운모는 약 0.5~1.0cm 크기의 침상 결정으로 관찰되며, 간혹 흑운모가 집합체로 산출된다. 석영 또는 장석 반정이 흑운모와 함께 관찰된다. 현미경 관찰결과, 사장석의 반정조직과 함께 흑운모와 백운모를 확인하였고, 추가적으로 장석 내 부분적으로 변질된 견운모를 확인하였다(도10). 원주 화강암의 대자율은 0.02-0.08( $10^{-3}$  SD)의 낮은 대자율을 갖는 전형적인 티탄철석 계열의 특징을 보이며,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  함량(중량 %)은 평균치 71.39, 14.58, 4.04, 1.81로써 화강암에 해당된다(표2).

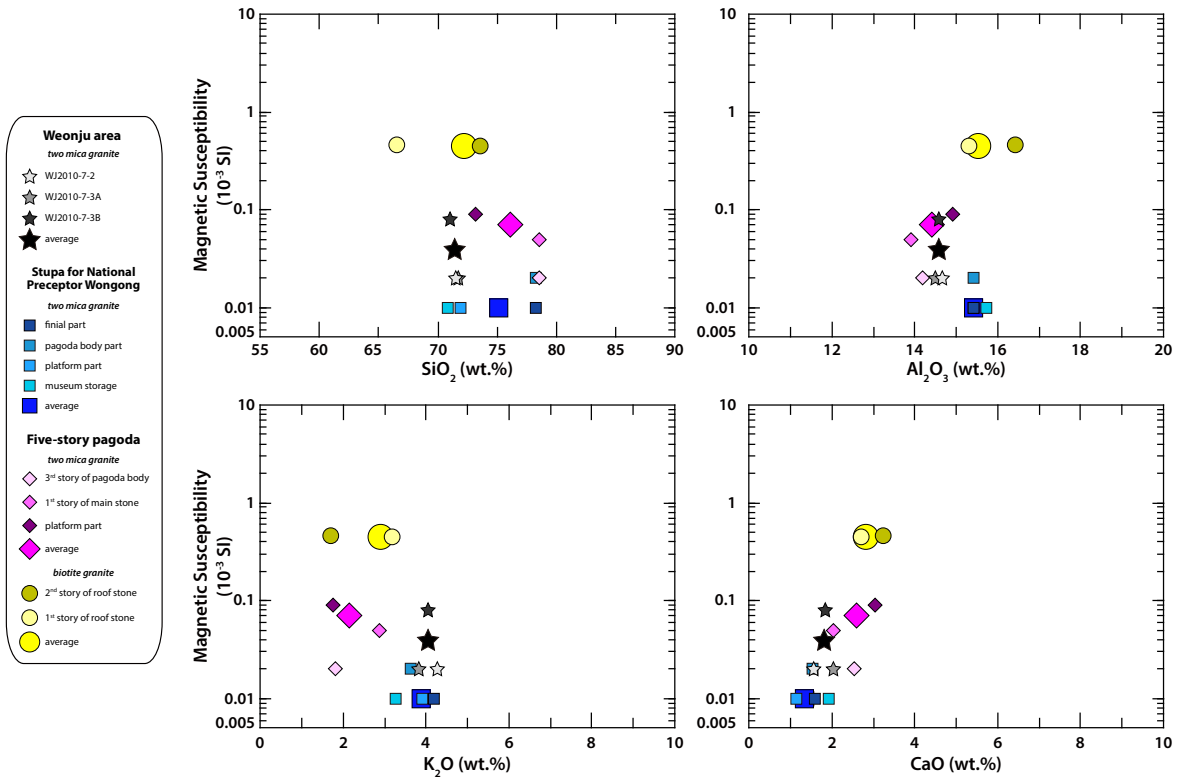
거둔사 원공국사 승묘탑, 천수사 오층석탑 및 원주화강암을 대자율과 화학조성으로 비교한 결과, 0.01-0.08의 유사한 대자율 범위를 보이고,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  함량(중량 %)은 평균치 71.39-76.10, 14.40-15.40, 2.20-4.04, 1.30-2.60으로써 서로 유사한 화학조성을 보인다(도11). 이를 통해, 두 석조문화재의 소재지별 화강암류 부재 분석자료는 기존 대보 화강암류의 강원지역의 암석특성과 서로 일치된 결과를 확인하였다. 원산지 추정은 석조문화재 소재지의 1/50,000 지질도에서 제시된 동일한 암석 종류를 적용하였다(도9).



도10. 원주 복운모 화강암의 시편 사진(a, b) 및 현미경 사진(c, d)

표2. 원주 화강암의 대자율 및 전암 화학조성

| sample   | WJ2010-7-2 | WJ2010-7-3A | WJ2010-7-3B |
|--|------------|-------------|-------------|
| <i>Magnetic susceptibility (<math>10^{-3}</math> SI)</i> |            |             |             |
|  | 0.02       | 0.02        | 0.08        |
| <i>Major elements (wt. %)</i>                            |            |             |             |
| SiO <sub>2</sub>   | 71.58      | 71.59       | 71.00       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                           | 14.67      | 14.50       | 14.58       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                           | 1.84*      | 1.84*       | 2.10*       |
| MnO  | 0.03       | 0.02        | 0.03        |
| MgO  | 0.38       | 0.49        | 0.52        |
| CaO  | 1.56       | 2.03        | 1.83        |
| Na <sub>2</sub> O  | 3.76       | 3.75        | 3.85        |
| K <sub>2</sub> O   | 4.26       | 3.82        | 4.05        |
| TiO <sub>2</sub>   | 0.28       | 0.26        | 0.36        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                            | 0.08       | 0.06        | 0.10        |
| LOI  | 0.75       | 0.79        | 0.65        |
| Total  | 99.18      | 99.15       | 99.05       |

\* total Fe as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

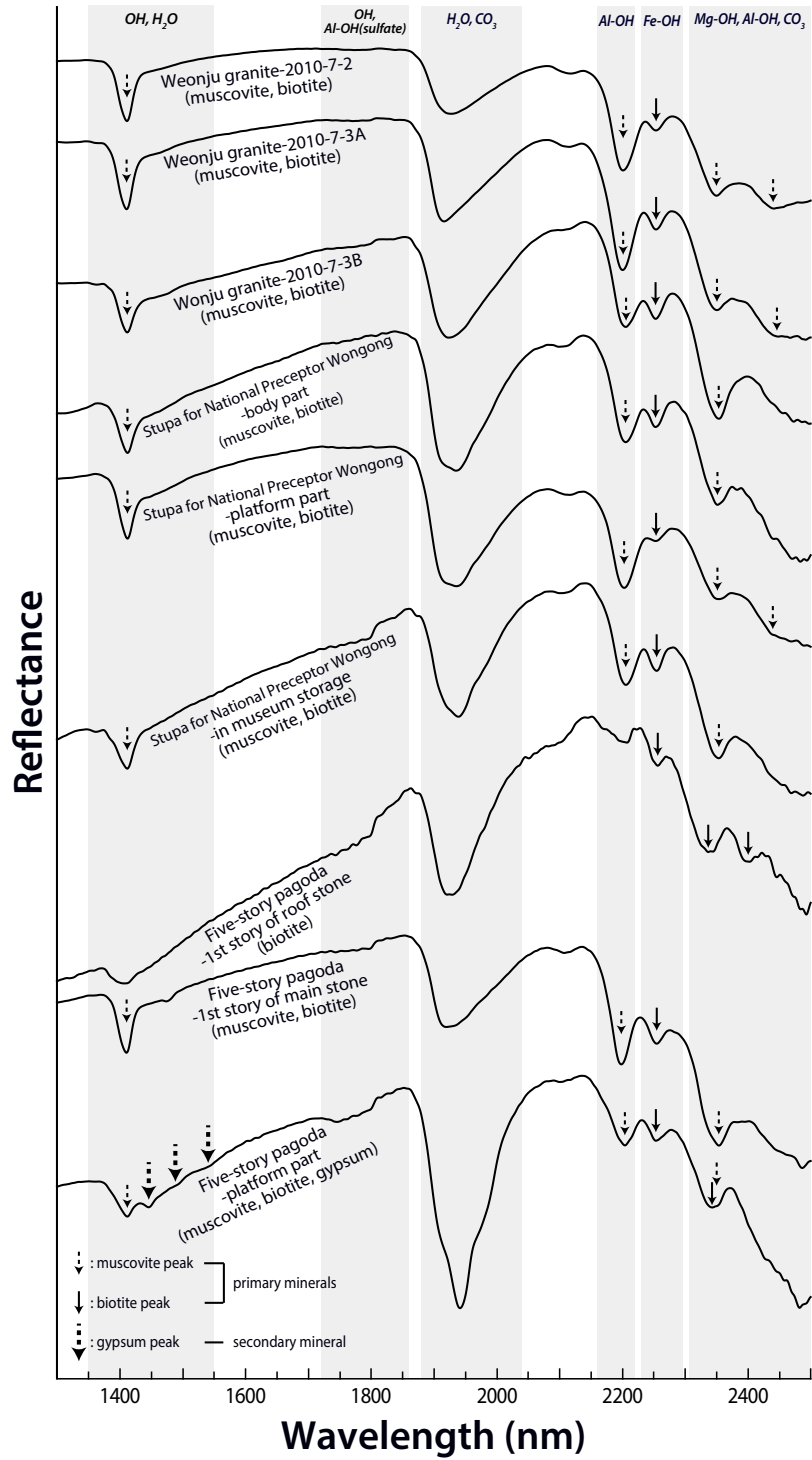
도11. 원주 화강암과 두 석조문화재의 부재별 대자율 및 화학조성 분포도



## V. 토의 및 결론

거둔사 원공국사 승묘탑과 천수사 오층석탑 부재를 대상으로 휴대용 분광분석을 통하여 화강암 내 일차·이차광물의 광물상을 동정하고, 복운모 화강암인 원주 화강암의 분광 스펙트럼과 비교하였다(도12). 거둔사 원공국사 승묘탑은 총 11회 분광분석 결과, 해당 화강암 부재는 백운모와 흑운모의 분광특성을 확인하여, 백운모-흑운모의 광물상을 보이는 복운모 화강암으로 분류된다. 또한 이차 풍화광물인 석고의 흡광피크가 확인되지 않는다. 천수사 오층석탑은 총 18회 분광분석 결과, 낮은 자화강도를 갖는 화강암은 백운모와 흑운모의 분광특성을 확인하였으나, 높은 자화강도를 갖는 화강암은 주로 흑운모의 분광특성이 우세하였다. 따라서 화강암은 백운모-흑운모의 광물상을 보이는 복운모 화강암과 흑운모 화강암으로 구분된다. 한편 휴대용 분광분석에서 화학적 풍화광물은 석고가 확인되었다(도12). 석고의 존재는 산성비에 포함된 황산염 성분과 복운모 화강암과 흑운모 화강암 내 사장석의 칼슘성분이 결합한 화학반응의 풍화산물이며, 실외에서 장기간 산성비에 노출된 화학적 풍화과정을 지시하고 있다. 분광분석 결과를 요약하면, 두 부재 모두 복운모 화강암으로 분류되며, 천수사 오층석탑은 추가적으로 흑운모 화강암을 확인하였다. 이는 육안 관찰, 자화강도 및 화학조성과 함께 단파장 적외선 분광분석 자료에서 제시된 결과가 서로 일치하고 있다.

강원지역의 석조문화재인 거둔사 원공국사 승묘탑과 천수사 오층석탑의 부재에 대한 암석 분류는 육안으로 산상과 광물상에 의한 일차 분류 및 비파괴 기기분석의 자화강도, 광물상 및 화학조성에서 측정한 자료들을 종합적으로 적용하였다. 그 결과 거둔사는 단일 부재의 복운모 화강암이 사용되었으나, 천수사 오층석탑은 복운모 화강암과 흑운모 화강암의 복합 부재로 확인되었다. 두 부재 모두 중립질의 입상 또는 반상 조직을 보이는 심부형 화강암류이며, 낮은 자화강도를 갖는 티탄철석 계열의 복운모 화강암으로 이는 경기육괴 대보 화강암류의 자화강도 분포 특징과 일치하고 있다. 부재의 산상 및 자화강도는 석조문화재의 소재지와 인접한 지역의 화강암 특성과 전반적으로 일치하며 이를 확인하기 위해 두 부재의 원산지 근처에서 채취한 원주 화강암을 비교 분석하였다. 석조문화재의 화강암류 부재는 조직, 입도, 자화강도, SWIR 분광분석 및 XRF 분석을 통하여 동질성 유무를 판단할 수 있으며, 원산지 비교 분석에서 자화강도, 조직, 입도 및 함수규산염광물상을 가장 중요한 분류기준으로 적용할 수 있다. 화강암류 부재는 물리적·화학적 풍화에 기인하여 표면이 미세 박막 상태로 분리되거나 미세 균열로 발달하며, 화학적 풍화는 SWIR 분광분석에서 이차 풍화광물로 석고를 확인하였다.



도12. 원주 화강암과 두 석조문화재의 부재 위치별 SWIR 분석결과



석조문화재의 복원 암석을 선택하는 기준은 일차적으로 색상과 입도, 조직과 같은 육안으로 유사성을 판단할 수 있으나, 복원 이후 풍화과정에서 유도되는 광물상 또는 화학조성의 차이에 따라 색상 변화가 유도된다. 천수사 오층석탑의 경우 두 종류의 화강암 부재를 사용하였고, 풍화과정의 민감도에 따라 현재 서로 상이한 색상을 나타내고 있다.

석조문화재의 복원에서 화강암류의 부재 선택은 입도, 조직, 자화강도, 광물상 및 화학성분의 유사성을 반영하여 종합적으로 검토할 필요가 있다. 천수사 오층석탑의 기단부는 기본적으로 낮은 자화강도를 갖는 중립질 복운모 화강암이지만, 복원 부재는 높은 자화강도를 갖는 조립질 흑운모 화강암으로 상이한 암석을 사용하였다. 이러한 복원 부재의 불일치성은 입도, 조직, 색지수 및 자화강도를 통하여 비파괴 분석에서 쉽게 비교될 수 있다. 향후 석조문화재의 복원 과정에서 유사한 부재 선택은 소재지와 인접한 화강암체의 현지 조사를 병행하여 수행할 필요가 있다고 사료된다.

---

## 참고문헌

1. 이태섭, 한국석재도감, p1-355, 한국지질자원연구원, 대전, (2007).
2. Clark, D.A. and Emerson, D.W. Notes on Rock Magnetization Characteristics in Applied Geophysical Studies, *Exploration Geophysics* **22**, p547-555, (1991).
3. Tarling, D.H. and Hrouda, F. *The Magnetic Anisotropy of Rock*, p1-217, Chapman & Hall, London, (1993).
4. 김창성, 김용휘, 최선규, 고광범, 한경수, 단파장적외선 분광분석법을 이용한 광물동정과 현장적용성, *자원환경지질학회지* **50**, p1-14, (2017).
5. 최위찬, 김규봉, 홍승호, 이병주, 황재하, 박기화, 황상기, 최범영, 송교영, 진명식, *한국 지질도(1:1,000,000)*, 한국자원연구소, 대전, (1995).
6. 박병권, 장호원, 우영균, *원주도폭 지질보고서(1:50,000)*, p1-19, 한국동력자원연구소, 대전, (1989).
7. 지정만, 윤선, 이창진, *문막도폭 지질보고서(1:50,000)*, p1-17, 한국동력자원연구소, 대전, (1989).
8. 김용준, 김정빈, 박재봉, 호남전단대내에 분포하는 엽리상화강암류의 암석화학과 성인, *지질학회지* **27**, p52-63, (1991).
9. 진명식, 신흥자, 권석기, *한반도의 화성암과 화성활동*, p1-310, 한국지질자원연구원, 대전, (2005).
10. 조등룡, 권성택, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 진화, *지질학회지* **30**, p41-61, (1994).
11. 홍세선, 각섬석 지압계를 이용한 영남육괴 내 화강암의 정치심도와 그 의미, *한국암석학회지* **10**, p36-55, (2001).
12. Jin, M.S., Lee, Y.S., Ishihara, S., Granitoids and Their Magnetic Susceptibility in South Korea, *Resource Geology* **51**, p189-203, (2001).
13. Uchida, E., Choi S.G., Baba, D., Wakisaka, Y., Petrogenesis and Solidification Depth of the Jurassic Daebo and Cretaceous Bulguksa Granitic Rocks in South Korea, *Resource Geology* **62**, p281-295, (2012).
14. Ishihara, S., The Inner Zone batholith vs. the Outer Zone batholith of Japan: Evaluation from their magnetic susceptibility, *Nature and Culture* **2**, p21-34, (1990).