

## 선암사 삼층석탑에 사용된 석재의 표면균열과 원산지에 대한 연구

박성철<sup>1</sup> · 김형규<sup>1</sup> · 성경환<sup>1</sup> · 김재환<sup>2</sup> · 좌용주<sup>1</sup>

<sup>1</sup>)경상대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>)국립문화재연구소 보존과학연구실

### 1. 서론

선암사는 신라 헌강왕 때에 도선이 창건하였으며, 삼층석탑 역시 이 시기에 세워진 것으로 추정된다. 본 탑은 선암사의 대웅전 내 동삼층석탑과 서삼층석탑의 2기로 세워져 있으며, 신라시대 석탑의 전형적인 양식을 잘 계승하고 있어 신라시대 불탑 연구에 훌륭한 자료로서 현재 보물 제 395호로 지정되어 있다. 하지만 탑의 부재들은 오랜 기간 동안 풍화에 노출 되어 있어서 표면 균열 및 그로 인한 깨짐과 탈락현상 등의 물리적 훼손이 두드러지게 나타나며, 삼층석탑의 전반적인 안정성이 문제가 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 탑의 안정성을 해치는 가장 큰 원인인 표면 균열 발달 양상을 조사 하였으며, 탑의 암석학적 조사 및 비파괴 검사를 실시하여 석재의 원산지를 규명하였다. 또한 탑에 사용된 석재의 원석을 이용하여, 삼층석탑의 표면 균열과 비교 분석하여 표면 균열 메커니즘을 규명 하고자 한다. 이 결과는 차후 시행 될 삼층석탑의 보존 및 수복(修復)을 위한 기초 자료로 활용될 것이다.

### 2. 연구 방법

선암사 동삼층석탑과 서삼층석탑을 대상으로 육안관찰 및 비파괴 분석(대자율)을 실시 하였으며, 이를 토대로 주변 지역에 대하여 석탑 부재 유사한 암석에 대하여 정방위 시료를 채취하였다. 원산지 해석을 통해 채취한 시료는 본 탑의 부재의 균열 발달양상을 파악하기 위해 암석의 역학적 이방성에 의해 나뉘지는 세 면 즉, 리프트 면(Rift plane), 그레인 면(Grain plane), 하드웨이 면(Hardway plane)을 설정하였으며, 이들 면에서 나타나는 광물의 미세균열을 관찰하기 위해 0.1mm 박편을 제작하여 광물 내 미세균열을 관찰 및 표시하였다(박덕원 외, 2004; 박덕원, 2007).

### 3. 연구 결과

#### 3-1. 선암사 삼층석탑

선암사 삼층석탑은 부재의 동, 서, 남, 북쪽의 위치별로 기단부에서 상륜부까지 균열에 의한 훼손이 크게 나고 있으며, 균열자체의 훼손뿐만 아니라 균열에 의해 2차적으로 파생되는 깨짐 및 부재의 탈락 그리고 박리·박락에 의한 훼손도 같이 나타나고 있다. 본 탑의 암석기재적 특징을 살펴본 결과 대부분 회백색으로 조립질의 입자 크기를 가진 등립질 조직의 흑운모화강암으로 판단된다(Fig. 1, Fig. 2). 하지만 동삼층석탑의 상대 감석의 경우 입자크기가 상대적으로 작은 세립질의 암석으로 되어 있으며 노반의 경우 확대경을 이용한 육안 관찰결과 탑의 대부분을 이루는 부재들과는 다른 사암으로 판단된다. 또한 서삼층석탑 노반의 경우 각섬암류의 암석으로 판단된다. 두 탑의 대자율 값( $\times 10^{-3}$  SI unit)의 범위는 동삼층석탑의 경우 전체 0.020~0.331의 범위를 가리키며, 서삼층석탑의 경우 전체 대자율 값의 범위는

0.003~0.250의 범위를 가리킨다. 측정결과 다소 낮은 값이지만 두 탑 모두 유사한 범위를 보이고 있다.



Fig. 1. 동삼층석탑(A:탑, B:표면, C:훼손현황). Fig. 2. 서삼층석탑(A:탑, B:표면, C:훼손현황).

선암사 동삼층석탑에 대한 균열의 방향과 깨어진 면(깨짐)의 방향을 측정 해 본 결과 균열은 N56°E~N82°E, N10°W~N87°W의 범위의 값을 가지며 깨짐은 N20°E~N88°E, N13°W~N88°W의 범위의 값을 가진다. 서삼층석탑에 대한 균열의 방향과 깨어진 면(깨짐)의 방향을 측정 해 본 결과 균열은 N20°E~N88°E, N10°W~N88°W의 범위의 값을 가지며 깨짐은 N10°E~N88°E, N13°W~N84°W의 범위의 값을 가진다.

### 3-2. 석탑의 부재와 동일한 암석을 이용한 연구결과

#### (1) 암석 기재 및 비파괴 검사

석탑의 부재와 동일한 암석은 중·조립질의 흑운모 화강암으로 회백색의 암석을 가진다. 육안관찰 결과 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모가 나타나며 석영은 1.5~4.5mm로 반자형에서 타형, 알칼리장석은 3~10mm로 반자형에서 타형, 사장석은 기질로 나타난다. 모드분석결과 석영은 39.13%, 알칼리장석은 8.46%, 사장석은 43.1%이며, 흑운모는 8.47%, 견운모는 0.87%를 차지한다. 이를 QAP 삼각도표에 도시하면 화강섬록암 영역에 도시된다.

전암 대자율 측정값( $\times 10^{-3}$  SI unit)은 0.042~0.098의 값을 가져 선암사 삼층석탑의 값과 유사한 범위를 가진다(Fig. 3).

따라서 암석기재적 특징, 모드분석, 대자율 분석 결과 선암사 내 동삼층석탑과 서삼층석탑에 부재로 사용된 암석은 선암사 바로 옆 계곡의 흑운모 화강암 지역에서 공급된 것으로 판단된다. 그리고 이를 뒷받침하는 증거로 이 지점에서 채석흔적인 썩기 흔적과 채석 후 남은 암석들이 관찰 된다(Fig. 4).

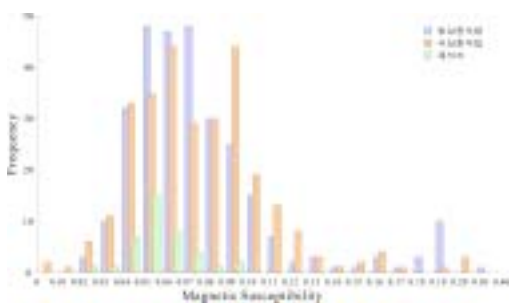


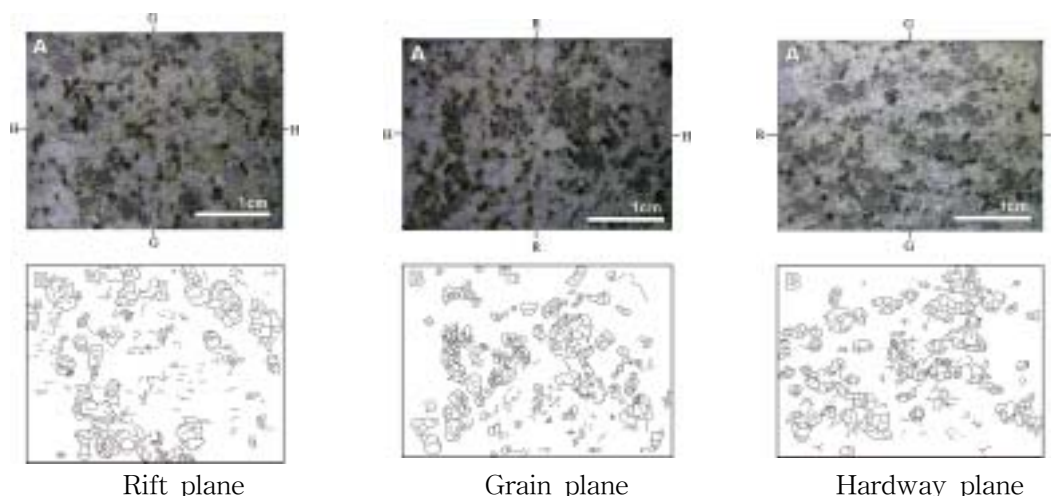
Fig. 3. 흑운모 화강암과 석탑의 대자율 히스토그램



Fig. 4. 흑운모 화강암에 나타나는 채석흔적

(2) 모암의 열린균열의 방향과 표면균열의 관계

Fig. 5는 동삼층석탑과 서삼층석탑의 모암인 암석을 세 면, 즉 리프트 그레인 및 하드웨이 면으로 절단하여 박편을 제작 하고 미세균열의 발달 상태를 파악한 것이다. 이 암석 내의 석영 결정 내부에 발달 해 있는 미세균열, 즉 열린균열의 방향성은 리프트 결인 R-R 선상 및 그레인 결인 G-G선상과 평행하거나 약간 사교하여 잘 나타나고 있다. 이 사실은 암석의 리프트 결에 의해 분리된 리프트 면과 그레인 결에 분리된 그레인 면이 균열 발달의 유효면임을 나타내고, 이 두 면이 균열 성장과 그에 따른 손상을 야기 시켰을 가능성이 높음을 시사한다. 한편 하드웨이 면에서 석영내 미세균열의 밀도가 높게 나타나는 것은, 미세균열의 방향성이 좋은 리프트 결과 그레인 결이 존재하기 때문이며, 추후 이러한 리프트 및 그레인 결에 의하여 균열 성장의 유효면이 발달 할 것으로 판단된다.



Rift plane                      Grain plane                      Hardway plane  
**Fig. 5.** 선암사 삼층석탑의 원암인 암석의 세 면에서의 미세균열의 발달 방향.

선암사 삼층석탑에서는 수평방향의 균열이 현저하게 나타나는데, 이 수평방향의 균열은 탑의 옥개석 중심부 및 중심 압축부로부터 떨어진 전각 가장자리에서도 잘 발견된다. 이는 탑 중심부에서의 강한 압축으로부터 멀어지면서 반발 인장이 작용하여 그에 따른 열린 균열이 성장한 것으로 해석 할 수 있으며, 균열의 수평면은 모암의 리프트 면에 해당 할 것으로 생각 된다. 특히 동삼층석탑의 3층옥개석 전각 부분의 수평 균열들은 세 방향으로 박혀 있는 철심의 영향으로 인해 균열의 성장이 촉진 된 것으로 판단된다. 또한 동삼층석탑 1층옥개석의 수평 균열은 리프트 결로 판단되며, 수직하는 균열의 경우 그레인 혹은 하드웨이 결인 것으로 생각되지만, 균열의 발달 양상을 보면 그레인 결인 것으로 판단된다(Fig.6).



**Fig. 6** 선암사 동삼층석탑에서 나타나는 수직, 수평 균열의 발달 양상.

#### 4. 결론

선암사 삼층석탑 부재에 대한 원산지 해석과 표면균열 형성에 관한 연구 결과 선암사 삼층석탑의 석재 공급지는 암석 기재학적 특징과 비파괴 검사인 대자율 측정치가 유사하며, 결정적으로 야외 노두에서 화강암에 켜기 흔적이 발견된 조계산 남측의 흑운모 화강암으로 판단된다. 한편 석탑 부재의 모암인 흑운모 화강암의 정방위 시료에서 각 결의 면을 절단한 1mm 박편을 관찰한 결과, 석영 내부에 발달하는 미세균열의 방향성은 리프트 결인 R-R 선상 및 그레이인 결인 G-G선상과 평행하거나 약간 사교하여 나타나고 있다. 이를 삼층석탑의 표면균열과 비교해 보면, 옥개석의 수평균열은 리프트 결로 판단되며 수직균열은 부재의 탈락부분 관찰결과 그레이인 결인 것으로 판단된다. 따라서 리프트 결에 의해 분리된 리프트 면과 그레이인 결에 의해 분리된 그레이인 면이 표면균열발달의 유효면임을 알 수 있으며, 이 두 유효면은 유체 내지 유기물질이 석재 내부로 침투하는 효과적인 통로를 제공하는 것으로 판단된다.

선암사 삼층석탑의 부재로 사용된 흑운모 화강암은 암석의 역학적 이방성에 의한 결의 방향성이 잘 발달된 암석으로 이중 특히 분리성이 가장 좋은 리프트 결에 의해 석탑의 균열이 성장하였으며 그에 따른 부재의 탈락을 야기시켰을 것으로 판단된다.

따라서 석조문화재의 보존 및 수복을 위해서는 부재에 대한 원산지 해석이 반드시 필요하며, 특히 암석의 역학적 이방성에 의해 나뉘지는 리프트 결과 그레이인 결은 암석의 구조적 약대로서 인식하고 이를 적극적으로 반영해야 된다.

#### 참고문헌

- 박덕원, 2007, 국내의 중생대 화강암류에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면의 방향성, 암석학회지, Vol. 16, No. 1, 12-26.  
박덕원, 김형찬, 이창범, 홍세선, 장세원, 이철우, 2004, 포천지역의 주라기 화강암에 발달된 결의 특성. 암석학회지, Vol. 13, No. 3, 133-141.