서울 홍지문 오간수문의 암석기재적 분석과 손상도 평가 및 보존처리

이명성 | 김지영* | 이찬희^{*.1} | 김영택** | 한병일**

국립문화재연구소 보존과학연구실, *공주대학교 문화재보존과학과, **(재)한국문화재보존연구원

Conservation Treatment, Deterioration Assessment and Petrography of the Hongjimun Ogansumun (Five-arched Floodgates) in Seoul

Myeong Seong Lee | Jiyoung Kim* | Chan Hee Lee^{*.1} | Yeong Taek Kim** | Byoung Il Han**

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

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

**Korea Institute of Cultural Heritage Conservation, Seoul, 134-882, Korea

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

초 록 홍지문 오간수문은 홍지문에 소속된 홍예 수문이다. 이들의 주요 구성암석은 흑운모화강암, 홍장석화강암, 화강섬록암으로서 서울 인근에 분포하는 화강암류와 암석기재적 특징이 매우 유사하다. 오간수문에 나타난 손상현상은 주로 백색, 흑색 및 황색 변색이며 백화현상이 가장 심각하다. 5기의 홍예 수문에서 공통적으로 측벽의 변색이 천장보다 심하고, 천장에서는 종유석이 성장하고 있다. 오염물 분석 결과, 백화현상을 야기하는 물질은 다양한 형태를 보이는 방해석으로 판명되었다. 보존처리는 오간수문 전면에 대한 건식세정과 표면에 피착되어 있는 백화물질을 제거하기 위해 부분적으로 고압세척 및 백화제거제 등을 사용하였다. 현재는 일차적인 보존처리가 완료되어 양호한 상태를 보이고 있으나 향후 오간수문의 훼손을 저감하기 위해서는 수문 상부에 배수로를 확보하여 수분의 이동과 배출을 제어하는 것이 필요하다.

중심어: 오간수문, 화강암, 백화, 보존처리

ABSTRACT The Hongjimun Ogansumun (Five-arched floodgates) is composed mainly of biotite granite, pink feldspar granite and granodiorite that are very similar with granitic rocks around the Seoul. Main damage in the floodgates was gray, yellow and predominantly white discoloration on the surface of stone blocks. All floodgates showed more discoloration in the wall than ceiling, and there were growing stalactite on the ceiling. Scientific analyses determined that the white discoloring substrates were mainly calcite. Therefore, conservation treatment was carried out to remove the substrates by using dry cleaning, high pressure cleaning and chemicals. The floodgates have been restored to good state, but it is still significantly necessary to install drainage on the top of the gates.

Key Words: Ogansumun, Granite, Efflorescence, Conservation treatment

1. 서론

홍지문 오간수문은 홍지문에 부속된 홍예 수문으로서, 조선 숙종 41년(1715)에 서울 도성과 북한산성의 방어시설을 보완하기 위하여 축조된 서성(西城)과 함께 건립되었다. 1921년 1월에 홍지문 문루가 붕괴되고 같은 해 8월에 오간수문이 홍수로 허물어져 흔적만 남아있던 것을 1977년 복원하였다. 현재에는 홍지문 및 탕춘대성 내 부속시설로써, 서울특별시 유형문화재 제33호로 지정되어 보호받고 있다 (Cultural Heritage Administration in Korea, 2012).

이 오간수문은 5개의 홍예교로 이루어져 있고 수문 밑으로는 홍예천이 흐르며, 상부는 다리로 되어 있어 통행이 가능하다(Figure 1A, 1B). 수문의 동쪽은 홍지문루와 연결되고, 서쪽은 탕춘대성의 성벽과 연결되는 구조를 갖고 있다. 이 수문은 1977년 복원공사 이후 백화현상이 지속적으로 발생하여 현재 부재의 거의 전면에 걸쳐 표면이 심하게 오염되어 있는 상태이다.

석조문화재의 백화현상은 빗물이나 지하수에 용해되어 있던 가용성 무기염류가 석출되어 석재 표면에 고체상의 회백색 분말 및 피각물질을 형성하는 것을 말한다. 이 백화현상에 대해서는 최근까지 다수의 논문이 발표된 바 있으나(Moropoulou *et al.*, 1998; Charola *et al.*, 2007; Török, 2008; Lee *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013), 생성 메커니즘과 거동특성에 대해서는 아직도 많은 연구를 필요로 한다. 또한 백화의 제어나 제거기법에 대하여도 보다 체계적인 연구가 필요하다.

이 연구에서는 홍지문 오간수문의 구성암석에 대한 암석학적 및 광물학적 특성을 밝히고 사용된 암종에 따른 암석분포지도를 작성하였다. 또한 백화현상의 현황을 파악하

고 훼손지도를 작성하여 손상도 평가를 실시하였다. 오간수문 구성부재 표면에서 변색을 야기하는 다양한 오염물을 채취하고 정성 및 정밀분석을 실시하여 오염물의 근원 및 발생인자를 해석하였다. 이 결과들을 근거로 가장 적절한 보존방법과 보존처리 방안을 제시하고 부분적인 보존처리를 수행하였다.

2. 연구방법

이 연구에서는 홍지문 오간수문의 구성부재에 대한 암석학적 및 광물학적 연구를 수행하였고 오간수문에 발생한 백화현상과 특성을 정밀조사하였다. 이를 위해 구성암석과 동일한 종류의 암석시편을 오간수문 주변에서 수습하였다. 암석학적 특성분석을 위해 구성부재 거의 전면에 대해 전암대자율을 측정하였다. 여기에 이용된 계측기기는 ZH Instruments사의 SM30 모델이며 대자율 단위는 10^{-3} SI unit로 표기하였다.

구성암석의 반정량적인 광물조성, 상대적 함량, 광물학적 공생관계, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성을 확인하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 여기에 이용된 기기는 자동계수기가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600W 편광/반사 겸용현미경이다. 또한 Rigaku제 D/Max-IIIB X-선 회절분석기를 이용하여 조암광물의 조성을 동정하였다. 타겟으로 사용한 X-선은 $\text{CuK}\alpha$ 에 양극의 가속전압 및 필라멘트의 전류는 각각 40kV, 100mA였다.

오간수문 구성암석 표면에 피각되어 있는 백화 물질을 규명하기 위해 오염물을 수습하였다. 이 백화물질은 구성암석과 동일한 방법으로 X-선 회절분석을 실시하였으며 이들의 미세조직, 생성과정 및 구성광물종을 관찰하기 위해

Figure 1. General views of the Ogansumun. (A) Side view of Five-arched floodgates. (B) Top surface of the Ogansumun.

Oxford사의 에너지분산형 성분분석기(EDX Inca M/X)가 장착된 JEOL사의 JSM 6335F를 이용하여 주사전자현미경(SEM) 관찰을 실시하였다. 시료는 백금으로 코팅하여 분석하였다.

한편 백화훼손도 진단에서는 백화의 분포 및 손상특성을 정밀조사하여 기재하였고, 실측도면을 활용하여 훼손지도를 작성하였다. 훼손지도 작성은 2D그래픽 전문응용프로그램을 이용하였다. 또한 작성된 훼손지도를 근거로 정량적 손상도 평가를 실시하였다. 보존처리는 오간수문 전면의 세정과 표면에 피착되어 있는 백화물질을 제거하기 위해 부분적으로 고압세척 및 백화제거제 등을 사용하여 진행하였다.

3. 부재의 재질특성

3.1. 전암대자율

오간수문에 사용된 암석의 미세자기적 특징을 파악하기 위해 전암대자율을 측정하였다. 전암대자율은 암석과 광물의 전체 미세자화강도를 구분하기 위해 응용된 암석학 연구의 한 수단으로 암석의 성인과 환경에 따라 측정값에 차이를 보이나 동일 마그마에서 생성된 암석들은 대부분 유사한 대자율 값을 나타낸다. 이러한 특성을 활용하여 최근에는 석조문화재 구성부재 및 석기 등의 원산지 해석에 활용

되기도 하였다(Lee *et al.*, 2007; Uchida *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010a; 2010b; 2010c).

오간수문의 대자율 측정은 대표적인 구성암석을 대상으로 실시하였다. 측정결과, 오간수문의 대자율값은 0.07~7.60(평균 3.98×10^{-3}) SI unit으로 비교적 넓은 범위를 보이고, 크게 두 그룹으로 나뉘어진다. 이는 성인이 다른 두 종류 이상의 암석이 사용된 증거이다. 이들을 암석기재적 특징에 따라 분류해 보면 흑운모화강암은 5.20~7.60(평균 6.29)의 대자율 분포를 보이며 홍장석화강암은 3.26~6.91을 보였다. 특히 홍장석화강암의 경우 구부재로 추정되는 암석은 평균 4.04을 보여 신부재(평균 5.50)로 사용된 암석에 비해 다소 낮은 값을 갖는다. 반면 화강섬록암은 0.07~0.12(평균 0.08)의 낮은 대자율 값이 측정되었다(Figure 2).

이와 같이 흑운모화강암과 홍장석화강암의 구부재와 신부재, 화강섬록암이 서로 다른 범위의 전암대자율 값을 갖는 것은 강자성 광물의 상대적인 함량 차이를 반영하는 것이다. 홍지문 오간수문을 구성하는 암석은 모두 화강암질 암이나 측정된 대자율 값으로 미루어 흑운모화강암과 홍장석화강암은 자철석 계열의 화강암에, 화강섬록암은 티탄철석 계열의 암석에 속함을 알 수 있다. 또한 동일한 성인의 마그마에서 생성된 암석이라도 분화경로가 서로 다를 수 있는 중요한 자료이며, 각각의 석재 공급지를 추정하여 양자의 동질성을 해석할 수 있는 자료가 될 것이다.

Figure 2. Magnetic susceptibility for stone blocks of the Ogansumun.

3.2. 암석기재적 특징

홍지문 오간수문의 연구대상 암석은 총 818개로서, 암석학적으로 비교적 유사한 특징을 보인다. 구성암석은 크게 흑운모화강암, 홍장석화강암 및 화강섬록암으로 분류된다. 이 암석들의 입자크기는 대부분 5mm 이상으로 조립질이나 광물조성은 비교적 균질하게 나타난다. 흑운모화강암은 전반적으로 담회색을 띠며 부분적으로 엽기성포획암이 관찰되기도 한다(Figure 3A, 3B). 홍장석화강암은 옅은 홍색을 띠는 장석이 우세하게 나타나고 신부재와 구부재로 구분되나 그 특징은 서로 같다(Figure 3C, 3D). 화강섬록암은 흑운모가 다른 암석에 비해 함량이 높으며 부분적으로 소규모 집합체가 관찰된다(Figure 3E).

홍지문 오간수문에 사용된 화강암류는 서울 인근에 분포하는 화강암류와 암석기재적 특징이 매우 유사하다. 서울 인근에 분포하는 화강암은 서울화강암으로 명명되어 있으며 서울-의정부-동두천-포천-기산으로 이어지는 북북동-남남서 방향으로 길게 대상 분포한다. 서울화강암은 선캄브리아기의 편마암류를 관입하고 있고 주변의 암석에 비해 풍화저항이 강해 고지대를 형성하고 있다. 이 화강암은 우리나라 중부에 분포하며 저반을 이루는 대보화강암이라 명명된 암체의 일부로서 중생대 주라기에 광범위하게 기반암을 관입한 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 1999). 이 화강암은 포천 및 양주 부근에서 현재에도 상업적으로 채석

되고 있다.

오간수문을 이루는 암석의 우점종을 동정하기 위하여 오간수문의 전면과 후면, 5개의 수문내부로 구분하여 정밀감식을 통한 암석의 동정을 실시하였다. 이 결과를 실측도면에 표현하면 전면과 후면, 오간수문 내부의 구성암종은 Figure 4와 같다. 이 암석들의 구성비율을 살펴보면, 흑운모화강암(65.3%)이 우점종을 차지하고 있으며 다음으로 홍장석화강암(24.8%)과 화강섬록암(9.9%)이 사용되었다(Figure 3F). 따라서 오간수문을 구성하고 있는 각각의 암석은 색상, 조직 및 광물 조성이 큰 차이를 보이고 있지 않지만 서로 다른 세 종류의 암석을 이용하여 제작하였음을 알 수 있다.

3.3. 광물학적 특징

오간수문을 구성하는 흑운모화강암과 홍장석화강암의 미세편을 박편으로 제작하여 현미경관찰을 실시하였으며, 분말시료를 만들어 X-선 회절분석을 하였다. 흑운모화강암은 조립의 등립질 화강암으로 조암광물은 파동소광을 보이는 석영, 정장석, 사장석, 흑운모 등이며, 부성분 광물로는 백운모, 녹니석과 불투명광물 등이 있다(Figure 5A, 5B). 이 중 사장석은 알바이트, 칼스바드-알바이트 쌍정과 부분적인 누대구조를 이루며 입자의 중앙을 중심으로 견운모화되어 있다. 흑운모는 짙은 갈색을 띠며 부분적으로 녹니석으로 변질되었다. 이 암석에 대한 X-선 회절분석 결과, 석

Figure 3. Lithology of the Ogansumun. (A) Coarse-grained biotite granite. (B) Xenolith in the biotite granite. (C) Newly replaced pink feldspar granite. (D) Original blocks of pink feldspar granite. (E) Granodiorite. (F) Percentage of each rock types.

영, 사장석, 알칼리 장석 및 흑운모가 검출되어 일반적인 화강암의 조암광물이 동정되었다(Figure 5E).

홍장석화강암도 흑운모화강암과 마찬가지로 조립의 등

립질이며 조암광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 불투 명광물 등이다. 이차적으로 생성된 백운모, 녹니석, 견운모 등도 관찰된다. 석영은 타형으로 거정을 이루며, 정장석과

Figure 4. Lithological maps of the Ogansumun.

사장석은 부분적으로 반정으로 산출되며 퍼사이트화 된 것도 관찰된다(Figure 5C). 또한 사장석은 반자형의 거정으로 관찰되며 내부는 변질로 인해 이차적으로 생성된 견운모가 나타난다(Figure 5D). 흑운모는 석영이나 알칼리 장석, 사장석의 입자들 사이에서 관찰되며 대부분이 변형된 벽면을 보이며 녹니석화되어 있다. 이 암석에 대한 X-선 회절분석 결과, 흑운모화강암과 유사한 석영, 알칼리 장석, 사장석 및 흑운모가 검출되었다(Figure 5E).

4. 손상도 평가

4.1. 표면오염물

오간수문에 발생한 백화현상은 매우 심각한 수준이며, 이 오간수문이 1977년에 전면적으로 복원되었다는 사실을 감안할 때 상당한 속도로 오염물층이 형성되고 있다는 것을 알 수 있다. 오간수문은 5기 홍예수문에서 모두 공통적으로 백화현상이 나타나며 그 정도도 거의 유사한 상태이다. 5기 수문의 거의 모든 부재에 걸쳐 백화가 발생한 상태이며, 오염물층의 두께는 심한 경우에 5cm 이상으로 발달한 부분도 있다(Figure 6A).

수문의 천장에서는 중유석 형태로 오염물이 지속적으로 성장하고 있으며 백색 오염물에 의한 백화현상과 함께 흑색과 갈색의 오염물도 함께 표면을 심하게 오염시키고 있다(Figure 6B). 홍예 내부의 측벽에서는 유수의 이동경로를 따라 백화현상이 두드러지게 나타나고 있으며 황색, 갈색

및 흑색 등으로 복합적인 변색 양상을 보인다(Figure 6C). 백색의 두꺼운 피각층을 제거하면 내부는 황색이나 갈색을 띠기도 한다. 이러한 백화현상은 부재 사이의 줄눈에 충전된 모르타르와 같은 석회물질이 원인을 제공한 것으로 보인다(Figure 6D).

특히 5수문의 경우 탕춘대성의 성벽과 바로 연결되는 부분으로, 성곽 내부의 수목환경으로 인해 수문까지 생물의 침해를 받은 상태이다. 수문 내부는 다른 수문과 마찬가지로 천장에는 백화 오염물층과 함께 중유석이 나타나며, 측벽에서는 유수의 이동경로를 따라 백색의 오염물층이 넓은 범위에 걸쳐 형성되어 있다. 또한 백화와 함께 흑색 및 황색 등 다양한 색상의 오염물이 산출된다(Figure 6E).

두꺼운 오염물층은 흑색 및 황색 변색층과 함께 산출되며 이러한 피각층을 제거하면 내부에 미세한 토양입자가 또 다른 층을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다(Figure 6F). 이 토양은 수분이 이동하면서 함께 유입된 것으로 판단된다. 천장의 중유석에서는 강수 후 며칠이 지난 후에도 지속적인 낙수가 일어나고 있으며, 중유석이 생성되기 직전에는 반점상의 백화가 나타나고 있다.

4.2. 오염물 분석

이 백화물질을 수습하여 주사전자현미경 분석과 X-선 회절분석을 실시하였다. HR-1은 완전한 백색을 띠는 오염물질로써, 피각층의 두께가 비교적 얇고 육안상 먼지나 토양 등의 침착이 일어나지 않은 시료이다(Figure 7A). 따라

Figure 5. Polarizing microphotographs of the Ogansumun. (A, B) Biotite granite composed of quartz, plagioclase, orthoclase and biotite with altered feldspar and mica along cleavage planes. (C, D) Pink feldspar granite composed of quartz, plagioclase, orthoclase and sericite. Qt; quartz, Or; orthoclase, Pl; plagioclase, Bt/Ch; biotite/chlorite. (E) X-ray diffraction patterns. HR-1; biotite granite, HR-2; pink feldspar granite. M; biotite, P; plagioclase, Q; quartz, Af; Alkali feldspar.

Figure 6. Discoloration of the Ogamsumun. (A) White efflorescence and gray discoloration inside the gate. (B) Growing white stalactite on the ceiling. (C) Vertical coverage of white contaminants. (D) White efflorescence in the indent mortar. (E) Red, yellow and gray discoloration. (F) Fine soils underneath the efflorescence layer.

서 다른 시료에 비해 비교적 생성 시기가 오래되지 않은 것으로 판단된다. 이 시료의 미세조직을 관찰하고 정성분석을 위해 주사전자현미경 및 SEM-EDS 분석을 실시하였다.

HP-1 시료의 미세조직은 매우 평탄하며 직경 10~30 μ m 단위로 엽편상 경계를 이루고 있는 모습이 관찰된다 (Figure 7B). 이를 확대하면 미세한 용식조직이 나타난다. 이는 수분이 지속적으로 공급되면서 이미 결정화된 입자들을 재용해시킴으로써 나타나는 현상으로 보인다. 단면에서는 육안관찰에서 확인된 바와 같이 층상구조가 잘 나타나며 평면보다 결정의 성장 형태가 뚜렷하게 관찰된다. 단면 조직은 일정한 간격을 두고 피각층이 발달한 후 층구조 사이의 빈 공간에서 오염물의 결정이 더욱 성장하는 모습을 보인다.

이 표면을 EDS 분석한 결과, 세 지점에서 모두 산화칼슘과 탄소가 검출되었다. 산화칼슘의 평균 함량은 91.4%로써, 표면의 대부분을 구성하는 원소로 나타났다. 탄소의 함량은 산화칼슘에 비해 매우 낮은 양이 검출되었다. 이는 이 오염물을 구성하는 주성분이 칼슘산화물임을 지시한다 (Figure 7C). 광물학적으로는 결정의 성장 형태로 미루어 방해석일 가능성이 높으나, 표면분석의 결과에서 산화칼슘에 비해 극히 낮은 함량의 탄소가 검출되어 방해석과 함께 생석회나 소석회가 함께 다량 산출되었을 가능성이 높다. 특히 생석회는 시멘트, 콘크리트, 석회다짐 등의 주요 성분으로써, 물과 이산화탄소와 반응하여 수산화칼슘과 탄산칼

슘을 생성시킨다. 따라서 HP-1 오염물에서 확인된 주성분은 방해석, 수산화칼슘 및 산화칼슘으로 해석된다.

HP-2 시료는 오간수문 홍예 내부에서 종유석으로 성장하고 있던 오염물로써, 외부 표면을 관찰한 결과, 매우 불균질한 표면 상태를 보였으며, 20~30 μ m 크기의 도변상 및 방사형 결정이 분포하고 있다 (Figure 7D, 7E). 이를 EDS로 분석한 결과, 소량의 나트륨, 칼륨 및 황이 검출되었다 (Figure 7F). 종유석 단면의 내부 표면에서는 방해석이 0.3mm 내외 크기의 다발상 결정으로 성장한 모습이 관찰되었다.

다양한 성상을 보이는 오염물과 백화 오염물층 내부에서 채취한 토양을 대상으로 보다 정확한 광물학적 동정을 위해 X-선 회절분석을 실시하였다. 이 결과, 모든 오염물 시료는 방해석이 우세하게 동정되었고, 토양 시료에서는 석영, 사장석, 정장석 및 방해석이 검출되었다. 이는 유수와 함께 유입된 미세한 토양 입자가 오염물층의 내부에서 오랜 시간 동안 침전되고 퇴적되어 생성된 토양집적물로 판단된다 (Figure 7G).

따라서 홍지문 오간수문에서 발생한 백화현상은 대부분 방해석의 석출로 인한 것이며, 방해석을 생성시킨 근원 물질은 오간수문 상부의 석고 박석 하부에 충전된 콘크리트와 부재 사이의 줄눈제로 충전된 모르타르로 판단된다. 콘크리트에는 다량의 칼슘이 함유되어 있고, 이 칼슘은 물에 의해 쉽게 용해가 일어나 결국 방해석의 생성을 유도한 것

Figure 7. Scanning electron microscopic images, EDS analysis and X-ray diffraction patterns of the white contaminants on the Ogansumun (partly modified Kim *et al.*, 2013). (A, B, C) HP-1. (D, E, F) HP-2. (G) X-ray diffraction patterns. Ca; calcite, Q; quartz, P; plagioclase, O; orthoclase.

으로 보인다.

4.3. 손상도 정량평가

홍지문 오간수문의 손상도를 정량적으로 평가하고 보존 처리에 이용할 수 있도록 훼손지도를 작성하였다. 도면의 작성은 우선 오간수문에서 육안관찰을 통해 확인되는 훼손 유형을 백색, 황색, 흑색 변색과 균열 및 탈락, 그리고 생물

오염으로 구분하여 분류하고 이들의 분포 범위를 도면에 표현하였다. 또한 실측도면에 표현된 부분은 사진 촬영하여 실내에서 사진과 수작업된 도면을 비교 대조하였다.

이를 통해 훼손 범위와 위치를 정밀하게 재확인하고 검증한 후 2D 그래픽 프로그램을 이용하여 최종 도면을 작성하였다(Figure 8). 이를 토대로 오간수문의 훼손유형별 점유면적을 백분율로 수치화하여 손상도를 정량적으로 평가하였다(Figure 9). 이와 같은 연구기법은 이미 국내외에 보

고되어 검증된 바 있다(Kim *et al.*, 2009; Jo and Lee, 2011; Jo *et al.*, 2012).

오간수문 전면(북측면) 외벽석에서는 백색 변색, 황색 변색, 흑색 변색 및 생물 오염이 주로 발생하였다. 특히 흑

Figure 8. Deterioration map of the Ogansumun.

Figure 9. Summary on deterioration rate of the Ogansumun.

색 변색(31.6%)이 백화로 인한 백색 변색(1.9%)보다 현저하게 우점하고 있다. 외벽석 표면의 대부분에서 흑색 변색이 발생하여 원암의 색을 판별하기 어려울 정도이며, 변색은 강우 시 수분이 이동하는 경로를 따라 발생하여 수직적인 분포를 보인다.

후면(남측면) 외벽석에서도 흑색 변색(25.4%)이 주요 훼손 현상으로 나타나고 있다. 백색 변색과 함께 복합적으로 나타나며 수직적 분포를 보인다. 이 외에도 황색 변색이 나타나고 있고, 전면에 비해 생물 오염은 거의 관찰되지 않는다. 이는 전면과 후면의 일조량 차이에 의한 생물 성장 환경의 차이에서 원인을 찾을 수 있다.

1수문 홍예 내부에서는 백색, 흑색 및 황색 변색이 주로 관찰된다. 이들은 보통 복합적인 산출양상을 보여 엄밀하게 색상의 경계를 구분하기 어려운 상태이다. 측벽에서는 벽면을 타고 수분이 이동하기 때문에 백화현상 또한 벽면을 타고 넓게 확산되는 반면 천장에서는 수분이 낙수 형태로 이동하기 때문에 백화의 분포 범위는 넓지 않으나 종유석 모양의 오염물 성장이 두드러진다.

2수문 홍예 내부에서는 전반적으로 백색 변색(38.5%)이 나타나고, 백색 오염물 위로 황색 변색과 흑색 변색이 함께 관찰되기도 한다. 변색은 주로 부재와 부재 사이의 줄눈 부분에서 시작하여 낮은 곳으로 흐르며 점차 확장되는 경향을 보이고 천장보다는 측벽에서 더욱 넓게 분포한다. 이는 수분이 상부로부터 유입되어 부재와 부재 사이의 틈을 통해 배출되기 때문이다.

3수문 홍예에서는 황색 변색(13.7%)과 흑색 변색(7.3%)이 1수문 홍예, 2수문 홍예보다 더 넓은 범위에 걸쳐 분포하며, 특히 부재 사이의 줄눈 주변에 심각하게 나타난다. 천장보다는 측벽의 변색 점유 면적이 더 넓다. 4수문 홍예는 2수문, 3수문 홍예보다는 변색에 의한 표면 훼손상태가 양호한 편이나, 측벽의 북쪽 벽면에서 매우 두꺼운 오염물

피각이 발달한 상태이다. 이 오염물층은 흑색 변색과 복합적으로 나타나고 있다.

5수문 홍예 내부는 5기의 수문 중 변색 상태가 가장 심각하다. 부재 거의 전면에서 걸쳐 백색 변색(58.2%)이 일어난 상태이며 백화 표면 위로 흑색과 황색 변색이 함께 발생하고 있다. 또한 균열과 탈락도 발생하고 있어 균열된 틈으로 수분의 유입이 더욱 활발할 것으로 예상된다. 측벽은 우수 경로를 따라 수직적인 변색 양상이 나타나고 넓은 점유 면적을 차지하는 반면 천장은 상대적으로 작은 점유 면적을 보이고 있다. 그러나 천장에서는 직경 1~5cm에 이르는 종유석이 발달하고 있어, 5수문 홍예가 백화에 의한 훼손상태가 가장 심각함을 알 수 있다.

5. 보존처리 및 관리방안

홍지문 오간수문에 발생한 변색 문제는 5기의 홍예 수문에서 모두 유사한 양상과 정도를 보인다. 공통적으로 측벽의 백색, 흑색 및 황색 변색이 천장보다 심각하게 나타나고 있으며, 천장에서는 종유석의 성장이 활발하게 진행되고 있다. 또한 흑색 및 황색 변색과 생물오염은 대부분 백색 오염물층을 기반으로 최외각 표면에 백화현상과 복합적으로 발생하였다. 따라서 보존처리는 오간수문 전면의 세정과 표면에 피각되어 있는 백화물질을 제거하기 위해 부분적으로 고압세척 및 백화제거제 등을 사용하여 실시하였다. 또한 보존처리 이후에 장기적이고 안정적인 보존관리를 위한 관리방안을 제안하고자 한다.

5.1. 건식세정

세정은 보존처리의 가장 기본이 되는 조치이기는 하나 단 한 번의 잘못된 처리로 인해 돌이킬 수 없는 손상을 가

저울 수도 있어 주의를 기울여야 한다. 세정을 통해 제거된 이물질 중 석재의 편이 포함될 경우 원상태로 회복하기란 불가능하기 때문이다.

일반적으로 건식세정은 직접 제작한 대나무칼과 스틱, 수술용 나이프, 붓 등을 사용하여 보존처리를 진행하며 오간수문에 발생된 지의류 등 생물오염과 백화오염물에 대해서도 건식세정을 수행하였다. 그러나 수문 천정과 내외벽 등 백화오염물이 두껍게 고착되어 있는 부분에서는 일반적인 방법으로는 제거가 어려웠다. 따라서 1차적으로 나무망치와 작은 정을 이용하여 제거하는 방법으로 진행하였다 (Figure 10A, 10B). 이 과정에서 석재 표면에 손상이 가지 않는 한도에서 강도를 조절하였으며 현장 상황에 맞게 작업효율을 극대화 하였다.

위와 같은 방법을 통한 건식세정(1차 제거)으로 두껍게 고착되어 있는 백화 오염물을 대부분 효과적으로 제거할 수 있었으며 석재표면이 드러나기 전까지만 수행하였다. 1차 세정 후 남은 잔존 이물질은 고압세척기와 백화제거제를 사용하여 제거하였다. 이와 같은 방법은 이미 국내외에 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2010b; Lee *et al.*, 2012).

5.2. 고압세정

엽상 및 고착 지의류의 잔존물이나 백화 오염물의 잔존

이물질을 제거하기 위한 처리방법으로 증류수를 이용한 습식세정을 실시하였다(Lee *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2010b; Lee *et al.*, 2012). 습식세정은 화학작용의 결과물로 석재표면에 수소결합의 전성이 발생함으로써 처리과정 중 2차적인 손상을 초래할 수 있기 때문에 처리에 주의를 기울여야 한다. 또한 사용의 편이성을 위해 증류수가 아닌 다른 물을 사용할 경우 각종 염 등이 석재 내부에 잔존할 수 있다. 이 물질들은 선택적으로 추출하기란 불가능하기 때문에 사용을 자제해야 할 것이다.

우선 습식세정을 실시하기 전에 증류수를 도포하여 오간수문 전면과 후면, 수문 내부가 습윤한 상태가 되도록 하였다. 이 후 건식세정으로 제거가 되지 않는 흑색 오염물이 고착된 부재에 대해서는 부드러운 솔을 사용하면서 수분을 주입하여 제거하였다(Figure 10C). 그러나 백화 오염물의 경우 두껍게 피착되어 있어 쉽게 제거되지 않아 고압세척기를 사용하였다(Figure 10D). 적용전에 주변 석축을 대상으로 임상실험을 통해 적정압력을 설정하였다.

고압세척기의 압력은 100~130bar(kg/cm²)이며 부분적으로 세정하여 석재표면의 수직응력 발생을 최소화 하였다. 또한 고압세척 시 원형을 그리며 작업함으로써 표면에 미세균열이 발생하지 않도록 하였다. 이때 주기적으로 고압세척기 강도를 달리하여 최대한 훼손을 가지 않는 범위 내에서 처리하였다.

Figure 10. Conservation treatment of the Ogansumun. (A, B) Physical cleaning using hammer and chisel. (C) Water cleaning using brush. (D) High pressure cleaning. (E) Chemical cleaning using efflorescence remover. (F) pH test.

고압세척 후 부분적으로 탄산칼슘이 용출되어 남아있는 부분은 백화제거제(라임졸)를 사용하여 제거하였다(Figure 10E, Table 1). 부재표면이 약품에 의한 변색 가능성이 있어 이를 조절하기 위해 리트머스시험지(pH test paper)로 지속적인 테스트를 수행하였다(Figure 10F). 또한 홍예석 표면을 증류수로 중성시켜 2차적인 표면훼손을 제어하는 방법을 적용하였다. 위와 같이 일차적인 보존처리가 완료되었으며, 이전과는 대조적인 모습으로 변화되었다(Figure 11).

5.3. 보존관리 방안

홍지문 오간수문에서 발생한 백화 오염물질의 공급원은 오간수문 상부의 박석 아래에 채워진 콘크리트가 주요 원

인으로 판단된다. 오염물질의 분포와 수분의 이동경로를 추적하면 수문 상부에서 다량의 수분이 유입되고 있는 것을 볼 수 있다. 이 수분에 용해되어 있던 칼슘과 이산화탄소가 최종적으로 방해석을 석출시킨 것으로 해석된다. 콘크리트에 함유되어 있는 다량의 칼슘은 수분에 용해되어 과포화 상태가 되면 염을 석출시킨다(Lee *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013).

또한 수문 상부의 다리를 살펴보면, 서쪽으로는 탕춘대성의 성곽과 연결되는 암반 비탈이 존재하고 남쪽으로는 다리의 난간 역할을 하는 여장 시설이 있다. 또한 북쪽에는 다리 가장자리에 낮은 단이 형성되어 있고 동쪽에는 홍지문루가 있다. 따라서 강우 시에 서쪽의 암반사면에서 내려오는 다량의 수분이 다리 쪽으로 집수될 수 있음에도 불구하고

Table 1. Material properties of the Limesol.

	Component	Color	Specific gravity	pH	Freezing point
Limesol	HCl	yellowish brown	1.12	≤ 0.4	-40℃

Figure 11. Photographs showing treatment effects of the Ogansumun. (A, B) External view of before and after treatment. (C, D) Internal view of before and after treatment.

Figure 12. Top of the Ogansumun. (A) Top covered with stone blocks without drainage. (B) Lime mortar partially deteriorated out in the interval of the stone blocks.

하고 다리 상부에는 이를 원활하게 배수할 수 있는 시설물이 전무한 상태이다(Figure 12A).

다리의 성곽 쪽으로는 많은 양의 낙엽과 토양이 퇴적되어 있어 수분의 증발을 저해하는 역할을 할 것이며, 다리 박석은 과거에 부재 사이를 모르타르로 메웠던 흔적이 있긴 하나 심하게 부식되어 탈락된 것이 대부분이다(Figure 12B). 이는 강수가 직접 수문의 홍예 내부로 쉽게 유입될 수 있음을 의미한다. 유입된 수분은 내부에 충전된 콘크리트에 장기간 유지되면서 칼슘을 충분히 용해시키고, 강우 후 며칠이 지난 후에도 수문 홍예 천장과 측벽으로 오염물질을 천천히 배출시키게 된다. 결국 다리 상부는 백화를 일으킬 수 있는 수분과 원인물질의 저수조 역할을 하게 되는 것이다.

따라서 현재 오간수문 표면을 덮고 있는 오염물을 제거하였지만 수분의 유입과 이동을 근본적으로 제어하지 못한다면, 백화 현상은 빠른 시간 내에 재발하게 될 것이다. 이 오간수문의 오염물은 향후 암석의 물리적 풍화를 촉진하는 인자로 작용할 수 있기 때문에 우선적으로 제거되어야 하며, 이와 함께 다리 상부에서 수분이 홍예 내부로 유입되는 것을 차단해야 할 것이다.

6. 결 론

1. 홍지문 오간수문은 홍지문에 부속된 홍예 수문으로서, 조선 숙종 41년(1715)에 당촌대성과 함께 건립되었다. 1921년 홍수로 붕괴되었던 것을 1977년 복원하였으나 백화 현상이 지속적으로 발생하여 표면이 심하게 오염되어 있다.

2. 오간수문의 구성암석은 세 종류로써, 흑운모화강암은 회백색을 띠며 염기성포획암이 관찰되기도 한다. 홍장

석화강암은 옅은 홍색을 띠는 장석이 특징적이고 화강섬록암은 흑운모가 주요 유색광물로 나타난다. 이들은 모두 서울 인근에 분포하는 화강암류와 암석기재적 특징이 유사하다. 이 중 가장 많은 구성비를 보이는 것은 흑운모화강암이다.

3. 오간수문에 발생한 표면변색은 백색, 흑색 및 황색으로 대표되며, 백화현상이 가장 심각하다. 5기의 홍예 수문에서 공통적으로 측벽의 변색이 천장보다 심하고, 천장에서는 중유석이 성장하고 있다. 또한 흑색 및 황색 변색과 생물오염은 대부분 백색 오염물층을 기반으로 표면에 백화현상과 복합적으로 발생하였다. 백색오염물의 분석 결과, 다양한 형태를 보이는 방해석으로 판명되었다.

4. 변색된 범위와 분포를 볼 때, 모든 수문의 벽면은 상부에서 하부로 변색 범위가 확장되고 있으며, 이 중에서 5수문 홍예 내부의 변색 상태가 가장 심각하다. 주로 부재와 부재 사이의 줄눈 부분에서부터 백화현상이 시작되어 부재 거의 전면에 걸쳐 백색변색이 일어난 상태이다.

5. 표면 오염물질을 제거하기 위해 소도구를 사용하여 석재에 손상이 가지 않도록 일차 건식세정을 실시하였고 이차로 고압세척기를 이용한 습식세정을 실시하였다. 이때 두껍게 피각된 오염물 등 잘 제거되지 않는 부분은 백화제거제를 사용하였다. 또한 세정이 완료된 후에는 증류수로 중성시켜 2차적인 표면훼손을 방지하였다.

6. 오염물은 오간수문의 내부에 채워진 콘크리트가 근원물질이며, 다리 상부에서 외부로 원활히 배수되지 못하고 수문 내부로 유입되는 수분이 백화현상을 야기한 것으로 판단된다. 따라서 향후 오간수문의 훼손을 저감하기 위해서는 배수로를 확보하여 수분의 이동과 배출을 제어하는 것이 필요하다.

참고문헌

- Charola, A.E., Pühringer, J. and Steiger, M., 2007, Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials. *Environmental Geology*, 52, 339-352.
- Cultural Heritage Administration in Korea, 2012, Detail description of Hongjimun and Tangchundaeseong. www.cha.go.kr, (in Korean)
- 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, 251-260. (in Korean with English abstract)
- Jo, Y.H., Lee, C.H. and Chun, Y.G., 2012, Material characteristics and deterioration evaluation of the 13th century Korean stone pagoda of Magoksa temple. *Environmental Earth Science*, 66, 915-922. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., Lee, C.H. and Lee, M.S., 2009, Quantitative deterioration assessment and microclimatic analysis of the Gyeongju Seokbinggo (Ice-storing stone warehouse), Korea. *Journal of Conservation Science*, 25, 25-38. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., Lee, C.H., Kim, R.H. and Shin, E.J., 2013, Characterization of white and black deposits on the surface of Korean stone cultural heritages. *Microscopy and Microanalysis*, in press.
- Lee, B.J., Kim, Y.B., Lee, S.R., Kim, J.C., Kang, P.C., Choi, H.I. and Jin M.S., 1999, Explanatory Note of the Seoul-Namchonjeom Sheet (1:250,000). Korea Institute of Geology, Mining & Materials, 1-64. (in Korean)
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Kim, J., 2012, Damage evaluation and conservation treatment of the tenth century Korea rock-carved Buddha statues. *Environmental Earth Science*, 64, 1-14. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Kim, J. and Lee, M.S., 2010a, Petrography and provenance interpretation of the stone moulds for bronze daggers from the Galdong prehistoric site, Republic of Korea. *Archaeometry*, 52, 31-44.
- Lee, C.H., Kim, M.Y., Jo, Y.H. and Lee, M.S., 2010b, Conservation treatment based on material characteristics, provenance presumption and deterioration diagnosis of the seven-storied Jungwon Tappyeongri stone pagoda, Chungju, Korea. *Journal of Cultural Heritage Studies*, Munhwaje, 43, 36-57. (in Korean with English abstract)
- 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., Lee, D.S., Kim, J. and Yang, H.J., 2009, Geochemical characteristics of surface efflorescence in the seventh century stone pagoda in Republic of Korea. *Environmental Geology*, 58, 197-204.
- Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J., 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, M.S., Han, M.S., Kim, J.H. and Kim, S.D., 2010c, Material characteristics, provenance interpretation and deterioration diagnosis of Shilla stone monuments in Jungseongri and Naengsuri, Pohang. *Journal of Cultural Heritage Studies*, Munhwaje, 43, 122-143. (in Korean with English abstract)
- Moropoulou, A., Bisbikou, K., Torfs, K., Van Grieken, R., Zezza, F. and Marci, F., 1998, Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. *Atmospheric Environment*, 32, 967-982.
- Török, A., 2008, Black crusts on travertine: factors controlling development and stability. *Environmental Geology*, 56, 583-594.
- Uchida, E., Cunin, O., Suda, C., Ueno, A. and Nakagawa, T., 2007, Consideration on the construction process and the sandstone quarries during the Angkor period based on the magnetic susceptibility. *Journal of Archaeological Science*, 34, 924-935.
-