

# 塙의 백화현상 규명 및 제거방안 연구

- 수원화성 백화현상을 중심으로 -

## Investigation and Removal Method of Efflorescence Phenomenon of Traditional Bricks

- Focusing on the Efflorescence of Hwaseong Fortress in Suwon -

정 광 용\*

Chung, Kwang-Yong

(한국전통문화대학교 보존과학과 부교수)

차 현 석

Cha, Hyun-Seok

(한국전통문화대학교 보존과학연구소 연구원)

### Abstract

This study progressed an investigation on the cause of the efflorescence phenomenon of bricks in Suwon Hwaseong Fortress, which is designated as a UNESCO World Heritage by using diverse scientific analyses. The samples were taken in Hwaseong and analyzed using XRD and SEM-EDS for the material identification of efflorescence. We observed under a polarizing microscope and measured absorption factors for the basic investigation for traditional bricks. As a result of material identification, soluble salt( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ) and insoluble salt( $\text{CaCO}_3$ ) were detected. There was no big difference between original bricks and repaired bricks under the polarizing microscope. However, in terms of the water absorption rate, bricks which were used for repair nowadays showed low water absorption rate(1%). In conclusion, soluble salt and insoluble salt appeared due to an effect of an air pollution and joint mortar. Soluble salt was removed in the rainy season, but insoluble salt was not removed. As a result of the efficiency and safety tests for chemicals removing efflorescence, chemical E is likely to be the suitable chemicals for the efflorescence phenomenon of traditional bricks in Suwon Hwaseong Fortress. In the future, consideration whether the use of lime is available or not should be studied through comprehensive researches including repair work, construction work and the environment factor with lime. Also, physical, chemical identifications of repairing bricks will be required.

주제어 : 백화 현상, 수원화성, 백화 분석

Keywords: Efflorescence, Suwon Hwaseong Fortress, Analysis of Efflorescence

### 1. 서 론

수원화성(水原華城)은 사적(史蹟) 제3호로 지정되어 있으며, 1997년 12월 유네스코에서 세계문화유산으로 지정한 우리의 역사와 과학기술을 알리는 귀중한 사료로서 역사적으로나 과학적으로 가치가 높은 문화유산이다.<sup>1)</sup>

특히, 성곽의 축조에 석재와 진을 병용하였고, 화살과 창검을 방어하는 구조뿐만이 아니라 총포를 방어하는 근대적 성곽구조를 갖추고 있으며, 용재를 규격화하고 거중기 등의 기계장치를 활용한 점 등에서 우리나라 성곽 중에서 가장 발전된 형태라고 할 수 있다.

화성 축성의 재료는 흙과 기단부의 화강암, 그리고 진

\* Corresponding Author : kychung@nuch.ac.kr

1) 김봉혁, 「수원 화성의 축성에 대한 지질학적 연구」, 석사학위논문, 강원대학교, 2008, pp.32-33

(塼)으로 구성되어있다. 구성 재료 가운데 중요한 특징적 요소인 전(塼)에서 화성 전역에 걸쳐 백화현상이 발생하고 있다.

전(塼)에 대한 보존과학적 연구로는 무령왕릉 전에 대한 재료학적 특성과 제작기법 및 연대측정을 실시한 연구와 녹유전에 대한 과학적 연구가 있었다. 또한 석조문화재에 대해서는 이미 역사학적, 고고학적 및 미술사학적 연구는 많이 진행되었으나 전(塼) 및 암석의 종류와 지질학적 구조안정성, 물리적 풍화와 훼손 및 보존방안에 관한 연구는 부족한 실정이다. 그러나 최근 들어 보존과학분야에서는 석조문화재에 대한 종합적 조사연구를 통해 풍화훼손도를 정량적으로 평가하는 등 종합적 연구가 진행되고 있다.

우리나라에서 전(塼)을 사용한 구조물은 전탑과 모전 석탑이 있으며 대부분 통일신라와 고려시대에 유행하고 세워진 것들이다. 전(塼)을 포함한 석조문화재의 백화현상에 대한 문제는 강회 및 줄눈 모르타르와 보수용 재료로서 시멘트의 사용과 함께 대두되었으며, 문화재의 손상예방 및 보존을 위하여 백화현상의 제거에 대한 연구가 진행되고 있다.

백화현상에 대한 종합적 조사연구는 국립문화재연구소에서 진행된 「전탑 등에 발생하는 백화현상의 원인과 대책 연구」와 「경주 석탑 및 석조물문화재 보수 정비 보고서」에서 조사된 바 있다. 그 외 석조문화재 보존처리 보고서에서도 백화현상에 대한 처리에 관한 언급이 있으며 이들 백화현상에 대하여 분석한 결과들이 기록되어 있다. 대부분의 석조문화재 및 전으로 이루어진 전탑 문화재의 백화현상은 X선 회절분석 결과 주로 방해석(Calcite, CaCO<sub>3</sub>)으로 동정되었으며, Na, K등의 무기염류 등도 나타났다. 이들 백화현상은 보수재료로 사용된 시멘트 및 부재와 부재사이를 연결하기 위한 백색 줄눈 모르타르에서 기인하는 것으로 나타났다.

본 연구는 수원화성의 구 전(塼) 및 보수용 전들의 물리적 및 광물학적 특성을 확인하고 과학적 분석을 통해 전에 발생하는 백화현상 물질을 동정하고 백화현상의 발생 원인을 규명하였다. 또한 석조문화재의 무기오염물 제거방법을 적용하여 수원화성 전(塼)의 백화현상을 제거하기 위한 방안을 모색하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2-1. 흡수율 측정

전(塼)은 표면과 내부에 작은 공극들이 존재한다. 이들

공극은 전돌 원료의 특성 및 소성의 특성을 부분적으로 나타내며, 이러한 특성은 전(塼)의 제작환경과 제작특성을 간접적으로 반영하는 것이다. 흡수율 시험은 전(塼)의 절건 질량과 표건 질량을 구하고 다음 식에 따라 산출하였다.

$$Q = \frac{m1 - m2}{m2} \times 100$$

○ Q : 흡수율(%)

○ m1 : 시험체의 표건 질량(g)

20±5℃의 맑은 물속에서 24시간 흡수시킨 다음 물에서 꺼낸 전(塼)을 흡수성이 좋은 천으로 눈에 보이는 물방울을 닦아 낸 후 바로 측정했을 때의 질량

○ m2 : 시험체의 절건 질량(g)

105±5℃의 건조기 내에서 24시간 건조한 후 꺼내어 상온까지 냉각했을 때의 질량

### 2-2. 편광현미경 관찰

편광현미경 관찰은 먼저 시료의 일부를 에폭시수지에 마운팅 한 후 연마지 #200, #500, #800, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000을 사용하여 순서대로 양호한 관찰면이 나올 때까지 연마하고, diamond cutter를 이용하여 연마면으로부터 약 3mm 정도의 두께로 절단한 다음 연마면을 에폭시수지를 이용하여 슬라이드 글라스면에 접착시킨다. 24시간이 경과한 다음 접착된 시료를 다시 연마지 #200, #500, #800, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000을 사용하여 0.03mm의 두께가 될 때까지 천천히 연마한 후 편광현미경상에서 시료를 관찰하였다.

### 2-3. 현장조사 및 시료 채취

수원화성 백화현상 추정 물질의 분석을 위하여 수원시 화성사업소에서 2011년 5월에 수원화성 성문 6개소에서 백화현상 물질에 대해 1차 시료를 채취하였으며, 2011년 7월 추가조사를 위하여 2차적으로 추가시료를 채취하였다. 시료 채취 장소는 <Tab.1>과 같다.

Tab.1 Locations samples were taken

Sampling	Location
1 <sup>st</sup> Sampling	Dongammun, Hwaseomun, Seoammun, Seonammun, Dongporu, Seobuk Gongsimdon
2 <sup>nd</sup> Sampling	Dongammun, Janganmun, Seonammun

현장 조사 시 표면오염물 상태를 조사하기 위하여 육안을 통한 관찰 및 Scalar사(Japan)의 DG3 휴대용디지털

털현미경을 이용한 전(塙)의 표면 촬영을 실시하였다. 그리고 조사현장에서 메스 등의 소도구를 이용하여 표면의 백화현상 물질과 줄눈 모르타르, 석회 등의 시료를 채취하였다.

2-4. 에너지분산형 X선 분석(EDS)

수원화성 관리사업소 측에서 채취한 표면오염물 시료를 건조한 후, 막자사발에 분말화하고 Pt 코팅을 90초간 실시하여 전처리하였다. 주사전자현미경에 부착된 에너지분산형 X선 분석기 (JEOL / JSM-7401F, BRUKER / XFlash 5030)로 현미경 상에서 관찰되는 부위를 정성 및 반정량 분석하였다(Fig.1). 각 시료 및 결정구조별로 60초간 EDS 분석을 실시하였다.



Fig.1 Compositional analysis instruments for efflorescence of traditional bricks

2-5. X선 회절 분석

채취한 표면오염물 시료를 분말화 한 후 XRD로 조성성분을 분석하였다. XRD 분석은 Rigaku D-max2200을 이용(Fig.1)하여 분석을 실시하였으며, 분석조건은 40kV/30mA의 Cu K $\alpha$ 선을 이용하여 10°에서 70°까지 분석하였다.

3. 분석결과

3-1. 흡수율 측정 결과

수원화성 성분의 구 전(塙), 1970년대 보수용 전(塙), 2011년 현재 보수용으로 사용되는 전(塙)의 흡수율을 비교해 본 결과, 구 전(塙)과 1970년대 보수용 전(塙)은 약 15% 정도의 흡수율을 나타내었고, 2011년 현재 보수용 전(塙)은 약 1% 정도의 아주 낮은 흡수율을 보이는 것을 확인할 수 있었다(Tab.2).

Tab.2 Absorption rate of traditional bricks

Type	Original traditional brick	Repaired brick	
		1970s	2011
Mass at overdry condition(g)	3287.6	6014.2	6951.4
Mass at saturated surface-dry condition(g)	3803.8	6930.4	7024.3
Absorption rate(%)	15.70	15.23	1.04

3-2. 편광현미경 관찰 결과

전(塙)을 제조한 토양 즉 점토의 기원암을 추적하는데 있어서 유용한 자료가 될 수 있는 방법 중의 하나는 기와의 조직 혹은 구성광물을 광학현미경으로 관찰하는 것이다. 아래 <Tab.3>은 구 전(塙), 1970년대 보수용 전(塙), 2011년 현재 보수용으로 사용되는 전(塙)의 미세조직사진이다. 대부분의 전(塙)은 주로 석영 결정을 다량으로 함유하고 있고, 각각이 서로 다른 조직을 가지고 있다.

Tab.3 Microstructure of traditional brick and repaired bricks

Type	Microstructure	
Original traditional brick from Seoammun		
	Quartz, Mica, Microcline, Plagioclase Opaque mineral, Coarse fragments, Uncertain mineral	
Repaired brick in 1970s from Dongammun		
	Quartz, Orthoclase, Opaque mineral, Uncertain mineral	
Repaired brick (2011)		
	Quartz, Mica, Microcline, Opaque mineral, Uncertain mineral	

3-3. 현장조사 결과

2011년 7월 현장조사 결과 1차 시료 채취한 부분 중 서암문, 서남암문, 동암문의 백화현상은 제거된 상태로 나타났다. 이는 2011년 6월 말부터 시작된 수원지역 장마로 인해 가용성 염류가 수분에 용해되어 제거된 것으로 사료된다. 그러나 화서문, 서북공심돈의 발생한 백화는 제거되지 않았으며, 추가적으로 최근 보수한 장안문에서 백화현상이 발생되었다(Fig.2).

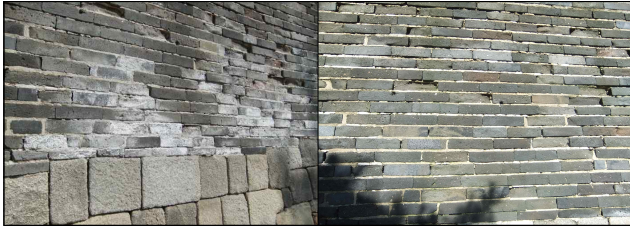


Fig.2 Naturally removed efflorescence (left figure: May, right figure: July)

3-4. EDS 분석 결과

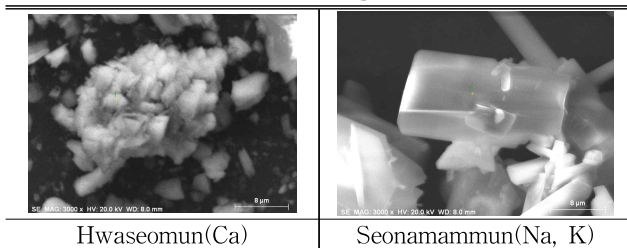
EDS 분석을 이용하여 각 지점별 백화현상 결정구조 관찰 및 조성성분 분석을 실시한 결과 <Tab.4>와 같이 비가용성 무기염과 가용성 무기염이 검출되었다.

EDS 분석결과는 XRD 분석결과와 동일한 원소가 검출되는 결과를 보였다. 그 외 추가적으로 Si, Al, Fe, Mg 등이 검출되는 일부 시료들은 토양 성분으로 확인되며, 이들 원소를 제외한 모든 분석 결과는 XRD 분석결과와 유사하게 나타난다.

Tab.4 SEM-EDS results

Location	Chemical element
Hwaseomun	Ca
Seobuk Gongsimdon	Ca
Dongammun	Na, K, Ca
DongPoru	Na, K, Ca
Seoammun	Na, K
Seonamammun	Na, K

SEM Image



3-5. XRD 분석 결과

XRD 분석 결과 백화현상 발생 시료는 크게 가용성 무기염과 비가용성무기염으로 분류되어 나타났다. XRD 분석결과로 검출된 성분은 다음 <Tab.5>와 같다.

추가적으로 장안문에서 최근 보수한 석회 및 줄눈, 동암문 줄눈 모르타르의 XRD 분석 결과는 <Tab.6>과 같다.

Tab.5 XRD analysis results

Type	Location	Major chemical composition
Soluble Salt	Dongporu	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Dongammun	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , KNO <sub>3</sub>
	Seoammun	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , KNO <sub>3</sub>
	Seonamammun	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , KNO <sub>3</sub>
Insoluble Salt	Hwaseomun	CaCO <sub>3</sub>
	Seobuk Gongsimdon	CaCO <sub>3</sub>
	Janganmun	CaCO <sub>3</sub>

Tab.6 XRD results of lime

Location	Sample	Chemical composition
Dongammun	Recent repaired lime at stairs	CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>
Janganmun	Lime at roof	CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>

4. 백화현상 제거 방안 및 대책

석조문화재 오염물에 대한 제거 방법은 크게 물리적 방법과 화학적 방법으로 나누어진다. 물리적 방법은 미세한 유리 또는 모래 입자와 같은 마모분말을 적절한 공기압으로 분사시켜 표면 오염물을 제거하는 방법이며, 화학적 방법은 오염물에 화학약품을 도포하여 화학반응을 통해 제거하는 방법이다.

문화재에 약품을 적용할 때는 검증이 이루어진 방법이라도 주변 환경과 전(塼)의 풍화정도에 따라 다른 양상을 나타낼 수 있으므로 예비실험을 적용한 후 사용 여부를 결정해야 한다.

본 연구에서는 석조문화재 무기오염물 제거에 사용되는 5종의 약품 및 증류수(Tab.7) 이용하여 수원화성 전(塼)에 발생한 비가용성무기염을 제거하는 화학적 방법을 실험하였다.

Tab.7 Chemicals used for removing efflorescence

Type	Chemical
A	HMK R63
B	HMK R77
C	Facade cleaning paste
D	Traffic film remover
E	Historic Lime Wash
F	distilled water

4-1. 제거약품의 안정성 평가

각 약품에 대한 전(塙)의 안정성 평가를 실시하기 위해 수원화성 복원용 전(塙)에 구획을 나누어 2회에 걸쳐 약품을 도포 후 24시간 경과 후의 색차 변화를 측정하였으며(Fig.3), 측정결과는 <Tab.8>과 같다.

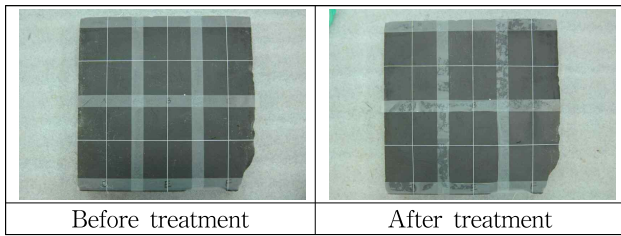


Fig.3 Safety evaluation for chemicals

Tab.8 Results of color difference and glossiness

Type	Apply once		Apply twice	
	$\Delta E$	G	$\Delta E$	G
A	2.96	-0.1	2.85	-0.1
B	3.76	0.1	4.28	0.2
C	2.00	-0.1	2.41	0.5
D	2.27	0	3.45	-0.3
E	1.27	-0.1	2.52	-0.1
F	1.26	0.1	0.66	0

$\Delta E$ 값은 처리 전과 처리 후의 색의 변화를 값으로 나타내는 것으로 일반적으로 3.0 미만이면 극히 근소한 차이로 육안으로 판별하기 어려운 정도로 판별된다. 측정결과 약품 B와 D를 제외한 나머지 3종의 약품에서는  $\Delta E$  값이 3.0 미만으로 육안으로 판별하기 어려운 정도의 색차 결과를 나타내어 세척 후의 안정성에는 3종의 약품이 이상이 없는 것으로 판별되었다. G값은 처리전과의 광택도의 차이를 나타내는 값으로 대체적으로 광택도의 미미한 변화만 나타났다. 추가적으로 디지털 현미경으로 세척 부위를 관찰한 결과에서도 특이 사항은 발견되지 않았다.

4-2. 백화물질 세척 결과

수원화성 전(塙)에 발생한 백화물질에 대한 세척력을

확인하기 위하여 장안문의 전(塙)에 발생한 백화에 6종의 약품을 도포하여 연구를 진행하였다. 도포는 붓을 이용하여 백화물질에 총 2회에 걸쳐 도포하였으며, 도포 후 육안 및 디지털 현미경 관찰을 실시하였다(Fig.4).

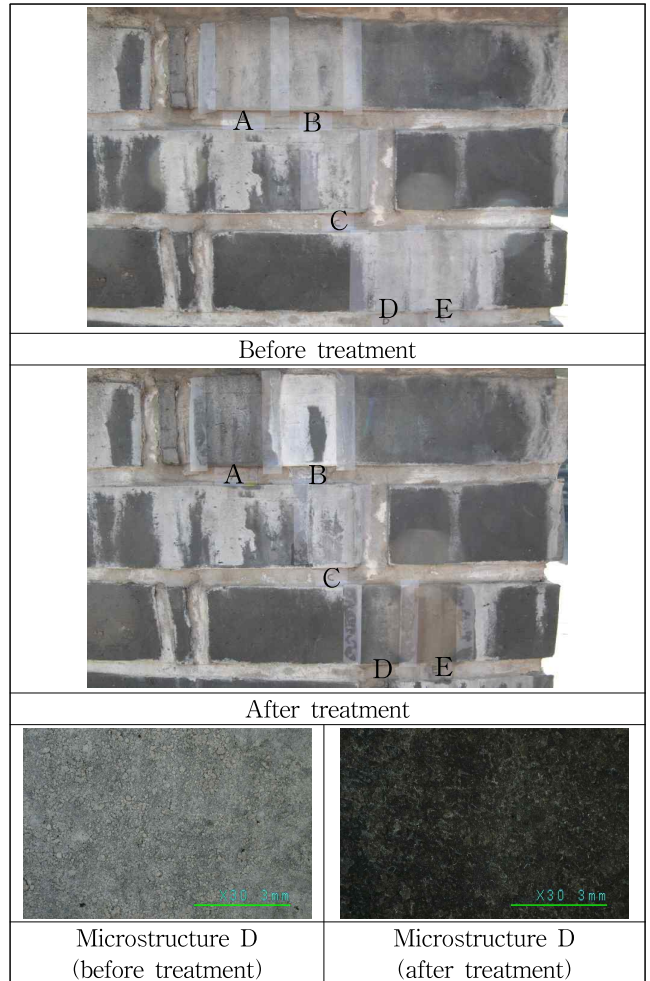


Fig.4 Result of chemical treatment

연구 결과 A, D, E약품이 고착된 백화물질의 제거에 효과를 나타내었으며, 특히 D약품과 E약품을 도포한 부분의 백화물질의 제거가 육안을 통해 확연하게 나타났다. 디지털현미경으로 확인한 결과에서 전(塙) 전체에 걸쳐 피각된 백화물질이 화학적 반응을 통해 제거되었음을 확인할 수 있었다.

위의 두 가지 연구결과를 토대로 종합하여 보았을 때 수원화성에 발생한 전(塙)의 백화현상 제거에 가장 적합한 약품은 E약품으로 판단된다.

4-3. 백화현상 제어 및 예방 대책

수원화성에 발생하는 백화현상을 제어 및 예방하기 위해서는 아래와 같이 이론적으로 가능하다. 그러나 수원화성 전(塙)에 바로 적용하기 위해서는 추가적인 임상실

험이 필요하고 실험결과에 따라 가장 적절한 처리 방법을 선택하여 사용해야 한다.

- 백화성분과 반응하는 물질을 첨가하는 방법으로 탄산칼슘이 생성되지 않도록 소석회와 반응하는 물질을 첨가한다.
- 모르타르 경화제 표면에 방수층을 형성하게 하는 방법이다.
- 모르타르 경화제 표면에 약품을 뿌려 외부 수(水)의 침입을 막는 방법으로 표면 경화제와 박막을 형성하는 방법을 사용한다.

수원화성 전(塙)에서 발생된 백화현상의 원인물질은 축성 및 보수를 위하여 사용된 석회 모르타르 및 시멘트와 전(塙)의 조성성분이 풍화 작용으로 공급되는 점토광물이다. 이들 침전물들은 관람객이 생성시키는 먼지와 함께 부착되어 있는 경우도 있다.

백화현상의 거동과 제어방법에 대해서는 아직까지 확실히 밝혀지지 않고 있으며, 백화발생에 따른 대책 또한 미봉책에 불과한 실정이다. 이러한 현상을 억제하기 위해 일부 백화방지제라고 부르는 혼화제가 시판되고 있는데 완전한 백화방지제는 아니다. 이는 기상조건 및 양생조건을 개선하여 이차적인 백화현상을 유도하는 원인물질을 줄이는 역할을 할 뿐이다<sup>2)</sup>.

현재 수원화성 백화현상에 대한 종합적 연구는 미진한 상태로 이들 제어 방법 및 보수 재료 사용에 대한 종합적 연구가 절실하다.

이 연구를 위해서는 백화현상의 원인물질을 줄일 수 있는 선행 연구가 필요하며, 이와 더불어 백화현상 부분의 효과적 제어를 위한 물질의 테스트를 함께 진행함으로써 수원화성 백화현상 예방 및 제어에 대한 종합적 대책을 마련할 수 있다. 또한 석회모르타르가 백화현상의 근본적 문제이므로 대체물질의 개발, 전통 전(塙)과 현재 전(塙)의 물리·지구화학적 특성규명 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 고 찰

수원화성의 구 전(塙) 및 보수용 전들의 물리적 성질을 확인하기 위해 흡수율 측정을 한 결과 흡수율은 구 전(塙) 및 1970년대 보수한 전(塙)이 15%정도의 흡수율을 나타내었으며, 2011년 보수한 전은 약 1%대의 낮은

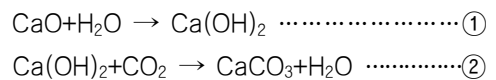
흡수율 결과를 나타내었다. 이는 전통기와의 제작방법이 태토를 발로 밟는 ‘인발미’ 방식이고, 현대기와는 토련기로 밀도를 높게 교반하는 ‘토련기’ 방식이므로 기와 내부의 기공이 많고 적음의 차이를 보이는 것과 관련이 있다고 할 수 있다<sup>3)</sup>.

수원화성의 구 전(塙) 및 보수용 전들의 편광현미경 촬영 결과 전들을 구성하는 광물간의 조성은 큰 차이를 보이지 않았지만 구 전(塙)의 경우 보수용 부재에 비해 상대적으로 석영, 사장석 및 정장석 등의 조암광물에서 매끄럽지 못한 쪼개짐이 관찰되어 부재의 풍화가 진행되었음을 확인할 수 있었다.

수원화성 성문의 백화현상 분석결과를 종합하여 보면 가용성 무기염류와 비가용성 무기염류의 발생으로 인해 백화현상이 일어남을 알 수 있다. 그 중 가용성 무기염류 발생지역은 주변 사이트 환경이 습도가 높거나 수풀이 우거져 있고, 그들이 있는 음지에서 백화현상이 발생하였다.

수원화성 성벽에 발생하는 백화현상 중 가용성 무기염의 생성은 무기물(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)을 함유하고 있는 줄눈 모르타르 및 전(塙)이 수분의 공급과 대기오염물질(SO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)이 반응하여 황산나트륨(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 질산칼륨(KNO<sub>3</sub>) 등을 형성하고 수분이 증발됨에 따라 전(塙)표면에 흡착된 형태로 존재하게 된다. 그 후 가용성염들은 우천으로 인해 용해되어 사라진 것으로 판단된다.

비가용성무기염은 전(塙)의 구조적 안정성을 위해 사용된 줄눈 모르타르, 지붕부의 강회, 콘크리트의 혼화제의 주성분인 생석회(CaO)가 수분과 반응(①)하여 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 생성하고 소석회가 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 반응하여 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 생성하는 반응(②)에 의해 발생된다. 석회의 사용은 강회인 생석회를 수화시켜 소석회를 만들어 사용하며 소석회는 충분한 양생과정을 거쳐 탄산칼슘으로 되어야 하나 소석회 내에 생석회의 함량 및 양생시간에 영향을 받아 백화가 발생한다.



백화현상의 발생원인은 무척 다양하나 그 중 석재에 나타나는 대부분의 백화현상은 비가용성염인 탄산칼슘의 생성으로 발생 원인이 재료에 기인한다. 환경 요인에 따라(겨울, 우천 시) 발생하며 공사 시공 시 충분한 양생기

2) 이동식 외, 「익산 미륵사지 석탑의 백화현상과 제어를 위한 용출 실험」, 『보존과학회지』 Vol. 19, 2006, pp.16

3) 정광용, 「송례문 기와의 물리적 특성 연구」, 『건축역사연구』 Vol. 20, No. 1, 2011, pp.32

간을 거치지 않거나 줄눈 모르타르 시공 시 공극이 있을 경우 더욱 많이 발생한다.

백화현상은 단순히 심미적 문제이거나 우수에 의해 자연적으로 제거될 수 있는 일시적인 현상일 수도 있다. 그러나 암석의 풍화작용에 의해 암석조직이 이완되어 있거나 층상 절리나 균열과 같이 패인 홈이 있다면 심각한 손상을 초래할 수 있다. 따라서 계속적인 염들이 피각되어 두꺼운 층을 형성하게 되면 약화된 표면을 박리 박락시키거나 분리시켜 심각한 파손이 발생된다.

수원화성 성벽에서 발생하는 백화현상 분석 결과 가용성 염인 질산염 탄산염은 주변 환경과의 반응으로 생성되었고 탄산칼슘은 줄눈 모르타르 및 지붕부의 강회가 수분의 이동에 따라 발생되었다. 서암문 등에서 가용성 염류로 발생된 백화현상의 경우 2차 조사 결과 우천으로 인해 모두 소멸되었으나, 비가용성 염류인 탄산칼슘은 그대로 남아있어 세척작업이 필요하다. 석회가 있는 한 탄산칼슘에 대한 세척작업을 하여도 다시 백화현상이 발생할 우려가 있다. 그러므로 줄눈 모르타르 및 지붕부에 사용되는 석회에 대한 보수공사, 공사 시공상의 문제, 공사 전후 환경요인에 의한 문제 등 종합적 연구를 통하여 석회의 사용여부에 대한 검토가 선행되어야 하며, 이를 통해 다른 물질로의 대체여부도 심도 있게 논의되어야 할 것이다.

현재 발생한 백화현상의 제거에 대한 연구 결과, 몇 가지 약품들이 백화물질의 제거에 효과를 나타내며 전(塙)에 대해 안정하게 측정되었다. 그러나 본 연구는 선행적 연구이고 전(塙)의 물리적 상황을 배제하여 실험하였고 장기적인 관점에서는 연구가 이루어지지 않았다. 또한 현 시점에서 백화현상을 제거한다고 하여도 이것은 미봉책에 불과하며, 고습한 환경에 노출된다면 다시 백화현상이 발생하는 문제가 있으므로 백화현상의 제거와 더불어 백화현상을 제어할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

이와 더불어 현재 수원화성은 여러 차례 보수가 이루어져 왔으나 보수 시 사용되는 전(塙) 들에 대한 안정성 조사 연구가 없었다. 그러므로 새로운 전(塙)을 이용하여 복원할 경우 과거의 전(塙) 및 현재 사용되고 있는 전(塙) 들에 대한 광물학적, 물리적 규명이 이루어져야 한다.

현장조사 결과 과거의 전(塙)보다 최근 보수된 전(塙)에서 백화 및 박리·박락 현상이 주로 발생하고 있다. 이는 전(塙)의 물리적·화학적 성질과 보수시 사용되는 석회 및 줄눈 모르타르 등에 기인한 것으로 추정되어 향후 보수 시 사용될 전(塙)에 대한 종합적 연구가 필요하다.

## 6. 결 론

수원화성 전역에 발생한 백화현상은 다음과 같이 두 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 수원화성 전(塙)의 축성 및 보수를 위하여 사용된 석회 모르타르 및 시멘트에 의한 비가용성 무기염류인 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)이 생성되는 백화현상이 발생되었다.

둘째, 강회 및 석회 모르타르, 전(塙)의 풍화로 인한 박리·박락과 주변 환경(고습)에 의한 내부 Na, K 등의 무기염과 대기오염물질(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>)에 의하여 발생하는 가용성 무기염류 및 부유토양과 함께 생성되는 백화현상이 발생된다.

백화현상의 제거를 위한 5종의 약품에 대한 백화 물질의 세척 및 전(塙)의 안정성 평가 결과 E약품의 경우 처리 후 색 변화에 대한 안정성에 이상이 없었으며, 육안 및 현미경 관찰을 통해 백화현상 물질이 제거되었음을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과를 종합하여 처리제의 성능을 살펴본 결과 수원화성에 발생한 전(塙)의 백화현상 제거에 가장 적합한 약품은 5종의 약품 중 E약품으로 사료된다.

## References

1. Lee, Chanhee, 「Cause and Solution of the efflorescence Phenomenon Ocurrred in Brick Pagodas」, 『Study on the Conservation and Management of Stone Culture Property』, 2001
2. Kim, Jin-Man·Kwak, Eun-Gu·Suh, Man-Cheol·Cho, Heon-Young, 「Questions and Solutions on Repair of Lime-Soil Consolidation in Traditional Buildings, 『Proceedings of The 15th National Meeting of the Korean Society of Conservation Science for Cultural Properties』, 2002
3. Park, Young-min·Lee, Hee-doo·Lee, Hea-jin·Lim, Nam-gi, 「The study on characteristic of efflorescence phenomenon and reduction plan through research」 『Proceedings of the Fall Conference announced The Korea Institute of Building Construction』 Vol.2, No.1, 2002
4. Choi, Sun-Mi·Kaug, Eun-Gu·Shin, Hong-Chul·Cho, Sung-Hyun·Choi, Se-Jin·Kim, Jin-Man, 「An Experimental Study on the Surface Stability of Concrete Tile」 『Proceedings of the Fall Conference announced Architectural Institute of Korea』 Vol.24, No.2, 2004

5. Shon, Byung-Hyun·Jung, Jong-Hyeon·Kim, Hyun-Gyu·Yoo, Jeong-Gun·Lee, Hyung-Kun, 「Effects of Salts and Acid Solutions on the Weathering of Granite」 『Journal of Korean Society of Environ Engineers』 Vol.27, No.1, 2005
6. Lim, Jae-Nam, 「A Study on Weathering, Deterioration and Material of the Brick Pagodas in the Korea」 Department of Geological Science, Kongju National University, 2005
7. Lee, Dongsik·Lee, Chanhee·Kim, Jiyoung, 「Weathering Impact for Rock Properties and Material Characteristics of Concretes Used Stone Pagoda of the Mireuksaji Temple Site, Iksan, Korea」 『Econ. Environ. Geol』 Vol.39, No.3, 2006
8. Lee, Ki-Gang, 「Analysis of Ca-rich efflorescence in ceramic bodies」 『Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology』 Vol.16, No.3, 2006
9. Lee, Dong-Sik·Lee, Chan-Hee·Kim, Sa-Dug, 「Formation of Efflorescence and Dissolving Experiments for Removing Control on the Stone Pagoda of the Mireuksaji Temple Site, Iksan, Korea」 『Journal of Conservation Science』 Vol.19, 2006
10. Kim, Bong-Hyeuk, 「A geological study for the construction Hwa-sung Fortress in Suwon, Korea」 Department of Earth Science Education, Kangwon National University, 2008
11. Do, Jinyoung, 「Deterioration of granite in Bunhwangsaseoktap(Stone pagoda of Bunhwangsa Temple)」 『Journal of Conservation Science』 Vol.17, 2008
12. Kim, Jiyoung·Lee, Chan Hee·Lee, Myeong Seong 「Quantitative Deterioration Assessment and Microclimatic Analysis of the Gyeongju Seokbinggo (Ice-storing Stone Warehouse), Korea」 『Journal of Conservation Science』 Vol.25, No.1, 2009
13. Chung, Kwang-Young, et al. 「Manufacturing the traditional roof-tiles for restoration of Sungnyemun」 National Research Institute of Cultural Heritage, 2009
14. Yi, Jeong-Eun, 「Material Characteristics and Interpretation of Weathering Mechanism for Bricks used in the Masonrt Modern Chultural Heritage, Korea」, Department of Cultural Heritage Conservation Science, Graduate School, Kongju National University, 2010
15. Jung, Jong-Hyeon·Jung, Min-Ho·Choi, Won-Joon·Seo, Jung-Ho, 「Effects of air pollutants on the weathering of stone cultural properties in Gyeongju」 『Journal of academia-industrial technology』 Vol.11, No.2, 2010
16. Chung, Kwang-Young·Kang, Won-Gu·Do, Mi-Sol, 「Studies for Traditional Tile Production Technique Using Neutron Activation Analysis」 『Ministry of Education, Science and Technology』, 2010
17. Chung, Kwang-Yong, 「A Study of the Physical Properties of Sungnyemun Tile」 『Journal of Architectural History』 vol..20, No.1, 2011

접수(2013. 10. 15)

수정(1차: 2013. 12. 5)

게재확정(2013. 12. 15)