

# 경주석빙고의 정량적 훼손도 평가와 미기후환경 분석

김자영 | 이찬희<sup>1</sup> | 이명성\*

공주대학교 문화재보존과학과, \*국립문화재연구소 보존과학연구실

## Quantitative Deterioration Assessment and Microclimatic Analysis of the Gyeongju Seokbinggo (Ice-storing Stone Warehouse), Korea

Jiyoung Kim | Chan Hee Lee<sup>1</sup> | Myeong Seong Lee\*

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

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

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

**초 록** 경주석빙고(보물 제66호)는 조선시대 얼음 저장고로서 주구성암석은 유백색 색조를 띠고 정동이 발달한 중립질의 알칼리화강암이다. 훼손도 평가 결과, 균열(12.5%), 이격(6.7%), 탈락(25.1%), 박락(20.9%), 백화현상(6.5%), 갈색 변색(9.8%), 암흑색 변색(2.0%) 및 생물에 의한 변색(26.5%) 등이 높은 것으로 확인되었다. 전체적인 물리적 훼손율은 43.7%로 홍예틀 1번과 2번에서, 변색에 의한 훼손율은 68.7%로 북벽에서 가장 높아 석빙고의 훼손 상태가 매우 심각한 것으로 평가되었다. 석빙고 내부는 겨울철을 제외하고 연중 90% 이상의 높은 상대습도를 유지하였으며, 내부 미기후는 외부 기후 변화에 의존하나 외부보다 변동이 현저히 적은 일정한 환경을 유지하고 있었다. 상대습도는 봄과 여름에 98~100%에 최빈값을 보였다. 훼손의 근본적인 요인은 강수와 지하수의 유입 및 결로수에 의한 높은 상대습도와 장기적인 수분 유지시간이다. 이 수분은 생물에 의한 변색, 부재의 재질약화, 구조체의 거동, 백화현상 등을 야기하였다. 한편 입구 전면의 사질토양으로 인한 분진과 부유 입자가 내부의 갈색 및 암흑색 변색을 가중시켰다.

**중심어** : 경주석빙고, 알칼리화강암, 훼손도 평가, 미기후

**ABSTRACT** The Gyeongju Seokbinggo (Treasure No. 66) is an ice-storing stone warehouse, consisting mainly of alkali-granite which shows milky white color and medium-grained textures with drusy cavities. As results of deterioration assessment, the deterioration rates were determined as crack (12.5%), disjoining (6.7%), breaking-out (25.1%), exfoliation (20.9%), efflorescence (6.5%), brown discoloration (9.8%), darkgray discoloration (2.0%) and biological discoloration (36.5%). Comprehensive physical deterioration rate and discoloration rate were calculated as 43.7% and 68.7%, respectively, that indicates the Seokbinggo has been severely weathered. Indoor relative humidity was above 90% except in winter season. Indoor microclimate was hardly fluctuating although indoor microclimate was dependent on the outdoor climate. The main cause of deterioration was high relative humidity and a long time of wetness due to penetration of rain, underground water and condensation. It was identified that the water brought out biological discoloration, dissolution of minerals, structural movement and efflorescence, and the dust from the ground soil in front of the entrance accelerated brown and dark gray discoloration on the stone surface.

**Key Word** : Gyeongju Seokbinggo, Alkali granite, Deterioration assessment, Microclimate

## 1. 서론

경주석빙고는 보물 제66호로 지정된 조선시대의 얼음 저장 창고로 잘 다듬어진 수매의 석재를 짜맞추어 홍예형태로 축조되었다(Figure 1). 입구의 석비와 이맛돌의 각자에 의하면 조선 영조 14년(1738) 당시 조명겸이 나무로 된 빙고를 암석으로 축조하였다는 것과, 4년 뒤에 서쪽 약 100m 지점에서 지금의 위치로 옮겼다는 것을 알 수 있다. 이 석빙고는 남한에 현존하는 6기의 석빙고 중 규모나 제작기법 면에서 가장 뛰어난 걸작으로 평가받고 있다.<sup>1</sup>

석빙고에 대하여는 미술사학적인 연구를 비롯하여 전 열효과에 관한 이론적 연구 및 실내환경 연구를 중심으로 이루어졌다.<sup>2,3,4,5,6</sup> 그러나 보존과학적 측면에서 구성 재질 및 훼손에 대한 자연과학적인 연구는 전무한 실정이다. 이 석빙고를 구성하고 있는 암석은 자연환경에 노출되는 시점부터 지속적인 풍화과정에 의하여 균열, 이격, 탈락

및 박리박락 등이 발생하여 재질이 상당히 약화되었으며 석재의 내구성 또한 많이 저하되어 있다. 이와 같은 암석의 풍화와 물성변화에 대해서는 이미 국내외의 전문가에 의하여 포괄적으로 논의된 바 있다.<sup>7,8,9</sup>

우리나라 석조문화재의 암석학적 특성과 풍화훼손도 진단에 관한 연구는 Lee *et al.*<sup>10</sup>과 최석원 외<sup>1</sup> 등에 의해 보고된 바 있으며, 특히 Kim *et al.*, 도진영과 윤운경은 경주석빙고를 대상으로 내부의 생물분포와 표면오염물에 관한 연구결과를 발표하였다.<sup>12,13,14</sup> 그러나 이러한 보존과학적인 연구는 아직은 초기 단계로 보다 심도있는 연구가 필요하다. 특히 훼손도를 평가하는 객관적인 기준과 근거가 이론화되어 있지 않아 정밀하고 정량적인 훼손도 진단 방법의 개발이 시급히 요구되는 실정이다.

경주석빙고는 반지하 구조를 갖고 있어 내부는 항상 다습한 환경이 유지되고 있다. 이로 인해 구성부재 벽면의 생물학적 오염이 매우 심각하며, 화학적 풍화에 의한 석재 표면의 변색 또한 발생하였다. 이 연구에서는 경주석

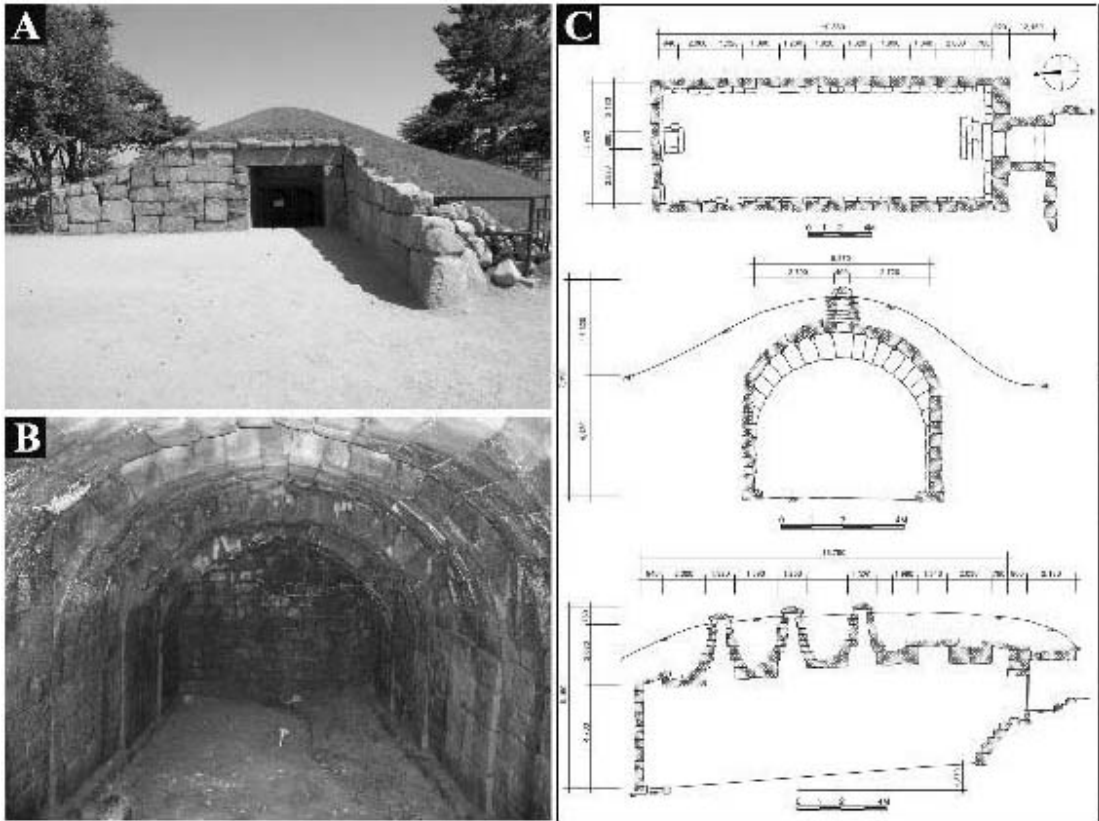


Figure 1. Occurrence of the Gyeongju Seokbinggo. (A) Entrance and external appearance. (B) Arched interior structure. (C) Ground profile and cross section plans of the Gyeongju Seokbinggo.

빙고의 풍화형태별 훼손도를 정량적으로 평가하고 풍화훼손에 영향을 미친 미기후적 요인을 검토하였다. 이 연구 결과는 경주석빙고의 보존수복에 근거자료로 활용될 것이며 석조문화재 풍화훼손도 및 환경 영향 평가기법을 표준화하는데 기초자료가 될 것이다.

## 2. 연구방법

이 연구에서는 경주석빙고의 구성재질에 대한 암석학적 및 광물학적인 연구를 수행하였고 풍화특성을 정밀조사하였다. 구성재질의 암석학적인 연구를 위해 전암대자율을 측정하였으며 이용된 계측기기는  $10^{-5}$  SI 단위의 측정 한계를 가진 KT-6(Pocket Susceptibility Meter) 모델이다. 구성암석의 광물조성, 상대적 함량, 조직 및 풍화에 의한 변질광물의 생성을 관찰하기 위해 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다. 이를 위해 자동 계수기가 장착된 Nikon사의 Eclipse E600 W 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다.

또한 Rigaku제 D/Max-IIB X-선 회절분석기를 이용하여 조암광물의 조성을 확인하였다. 타겟으로 사용된 X-선은 CuK $\alpha$ , 양극의 가속 전압 및 필라멘트의 전류는 각각 40kV, 100mA이었다. 오염물의 종류와 근원을 파악하기 위해 위와 동일한 방법으로 X-선회절분석을 수행하고 미세조직 및 형태적 특징을 관찰하기 위해 Oxford사의 에너지분산형 성분분석기(EDX Inca M/X)가 장착된 JEOL사의 JSM 6335F를 이용하여 주사전자현미경(SEM) 관찰을 실시하였다. 시료는 백금으로 코팅하여 분석하였다.

훼손도 진단에서는 손상유형을 물리적인 훼손과 유기 오염물에 의한 변색으로 크게 구분하고 각 항목마다 세부적인 훼손 유형을 분류하였다. 이를 기준으로 모든 부재마다 각 유형별 풍화 및 손상 특성을 정밀조사하여 기재하였다. 또한 내부 구성부재의 풍화된 표면에 대해 정밀 실측도면을 이용하여 훼손 유형별로 정량적인 훼손 지도를 작성하고 각 유형별 점유율을 산출하였다.

훼손에 영향을 미치는 미기후 요소를 규명하기 위해 2004년 8월부터 2005년 8월까지 매 2시간 간격으로 내부의 기온과 상대습도를 측정하고 이를 외부의 기상변화와 비교분석하였다. 또한 내부 부재 표면의 온도를 측

정하여 결로 발생 여부를 확인하였다. 측정에 이용된 기기는 NTC (Negative Temperature Coefficient) 서미스터와 전기저항식 습도센서가 장착된 독일 TESTO사의 Testo 175-H2와 Testo 177-H1 로서,  $\pm 2\%$  RH,  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 정밀도와 0.1% RH,  $0.1^\circ\text{C}$ 의 분해능을 가지고 있다. 또한 표면 온도 측정에는  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 의 정밀도와 0.1 $^\circ\text{C}$ 의 분해능을 가진 표면부착식 열전대가 이용되었다.

## 3. 석재의 재질특성

### 3.1. 재질의 다양성과 전암대자율

경주석빙고는 형태와 재질이 다양한 석재로 축조되었다. 대부분은 잘 다듬어진 방형의 석재로 주로 구성되었으나 일부 재활용된 것으로 보이는 부재도 다수 관찰된다(Figure 2A). 석빙고 내외부의 구성암석은 화강암류로 주로 알칼리화강암, 흑운모화강암, 미문상화강암, 반화강암, 세립질 화강암, 각섬석화강암 등이 혼용되었다(Figure 2A, 2B). 석벽의 가장자리는 다듬지 않은 잡석을 이용하였는데, 주로 안산암질암, 세립질 호온펠스, 응회암 등이 다양하게 사용되었다(Figure 2C). 이 중 알칼리화강암이 가장 우세한 것으로 나타났다.

구성암석의 전암대자율은  $0.02\sim 17.00(10^{-3}$  SI unit)의 범위에서 비교적 넓은 분포를 보이나 대부분의 값은  $0.00\sim 2.00(10^{-3}$  SI unit) 사이에 집중되어 나타났으며, 전체 평균은  $1.66(10^{-3}$  SI unit)로 거의 균질한 값을 보인다. 석빙고의 외부와 내부를 구성하는 석재 사이에는 큰 차이를 보이지 않고 대체로 유사한 전암대자율을 나타냈다. 다만  $8.00(10^{-3}$  SI unit) 이상의 높은 대자율값을 보인 일부 석재는 경주석빙고를 구성하는 일반적인 화강암류 석재와는 성인이 다른 암석임을 유추할 수 있다. 전암대자율 측정의 결과로 미루어 볼 때 경주석빙고는 지질 석계열과 티탄철석계열에 속하는 여러 종류의 화강암류가 혼용되었음을 알 수 있다(Figure 2D, 2E).<sup>15</sup>

### 3.2. 암석학적 및 광물학적 특징

경주석빙고의 구성암석은 경주 일대에 분포하는 화강암과 암석학적 및 광물학적 특징이 매우 유사하다. 이 화

강암체는 조직과 광물함량에 따라 화강섬록암, 세리이 트화강암, 등립질화강암, 반상화강암, 미문상화강암 그리고 알칼리화강암으로 세분된다.<sup>16</sup> 이 중 가장 높은 점유율을 보이는 알칼리화강암은 A-형 화강암으로 분류되는 소위 남산화강암이다. 남산화강암은 중립질에서 세립질 조

직에 정동구조가 발달하였다. 또한 석영, 피사이트, 흑운모, 형석, 각섬석 및 불투명광물로 구성되어 있으며 부분적으로 반자형 입상조직을 갖는다.<sup>17</sup> 이 남산화강암은 불국사 다보탑의 주구성암석이기도 하다.<sup>10</sup>

경주석빙고에서 관찰되는 알칼리화강암은 전체적으로

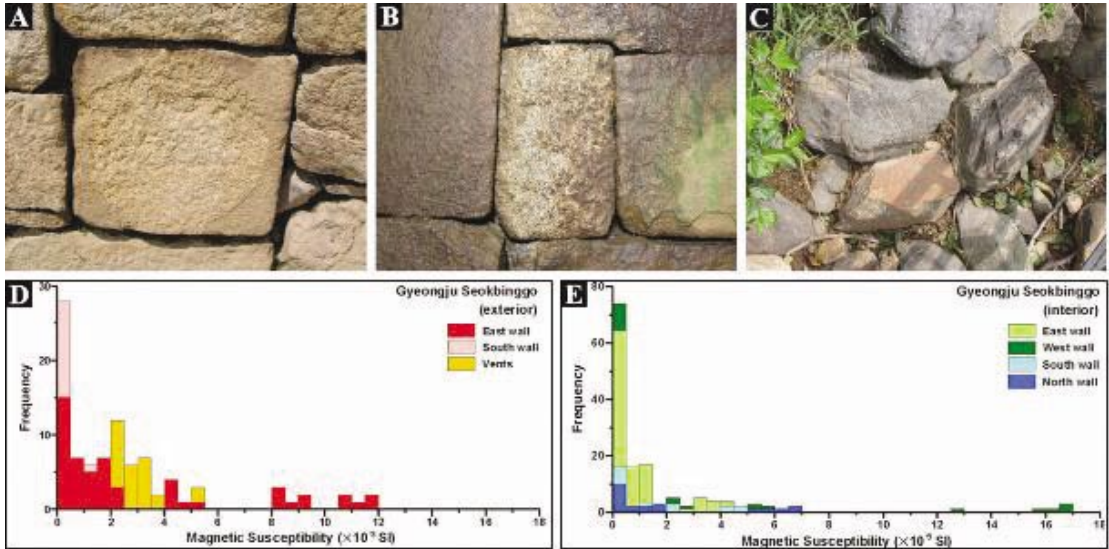


Figure 2. Various rock materials of the Gyeongju Seokbinggo and magnetic susceptibility. (A) Granitic stone used for a foundation of a wooden pillar. (B) Major rock type of alkali granite. (C) Hornfels and andesitic tuff as accessory rock types. (D) Distribution of magnetic susceptibility for exterior rock blocks. (E) Distribution of magnetic susceptibility for interior rock blocks.

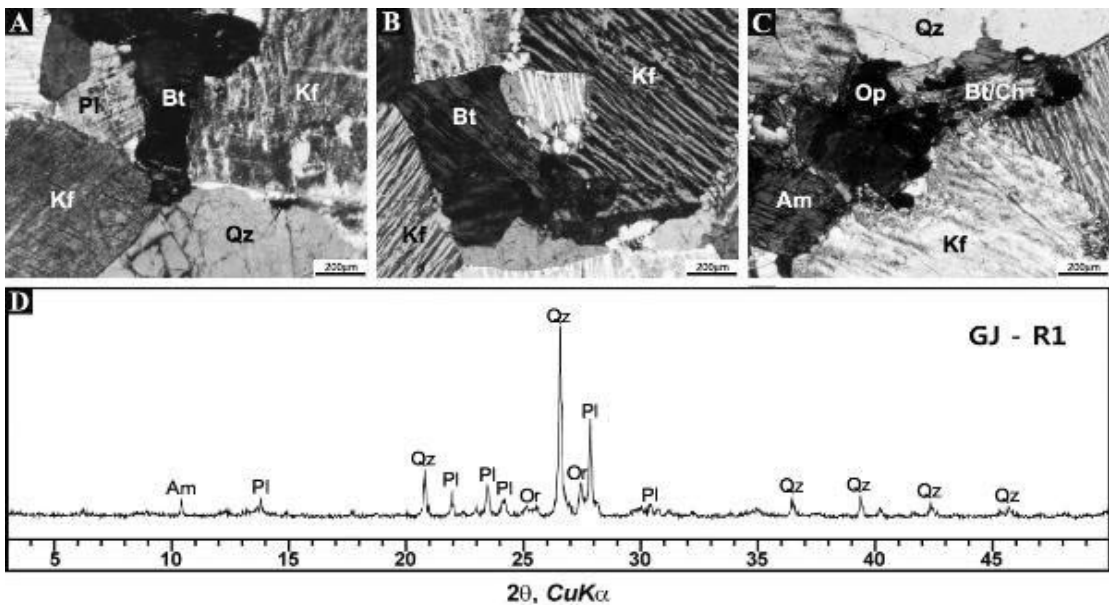


Figure 3. Polarizing microscopic images and X-ray diffraction patterns of alkali granite. (A, B) Equigranular and medium grained perthite showing varied minerals of K-feldspar, quartz and biotite. (C) Biotite altered into chlorite due to weathering process. (D) X-ray powder diffraction patterns of alkali granite. Qz: quartz, Kf: K-feldspar, Pl: plagioclase, Or: orthoclase, Am: amphibole, Bt: biotite, Ch: chlorite, Op: opaque mineral.

유백색의 밝은 색조를 띠며 정동구조가 발달한 등립의 중립질 입상조직을 갖는다. 알칼리화강암의 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시한 결과, 석영, 알칼리 장석, 각섬석 및 흑운모가 확인되었다(Figure 3A). 알칼리 장석은 대부분 퍼사이트화 되었으며(Figure 3B) 흑운모는 입자의 경계와 벽개면을 따라 녹니석으로 변질되어 있다(Figure 3C). 또한 동일한 시료를 분말화하여 X-선 회절 분석한 결과 석영, 정장석, 사장석 및 각섬석이 동정되었다(Figure 3D).

#### 4. 정량적 훼손도 평가

##### 4.1. 물리적 훼손

경주석빙고의 훼손도 평가를 위해 풍화유형별 훼손현상을 기재하고 훼손지도를 작성하였다. 이 과정은 육안관찰이 가능한 수 cm 내지 수 m의 범위 내에서 발생한 훼손현상을 대상으로 수행하였으며 도면화된 자료는 정량적인 훼손율을 산출하는데 이용되었다. 훼손유형의 분류는 크게 물리적인 훼손과 변색에 의한 훼손으로 구분하고, 균열, 이격, 탈락, 박락, 백화, 갈색 변색, 암흑색 변색 및 생물에 의한 변색으로 세분하였다(Table 1). 물리적인 훼손유형은 부재의 개수를 근거로, 변색의 훼손유형은 표

면 피복도를 근거로 정량적 훼손율을 산출하였다.

물리적 훼손은 석빙고 내외부 구성부재에서 다양하게 발생하였다. 내부의 홍예 구성부재를 중심으로 균열된 부재가 다수 관찰되며, 균열은 인접 부재로 연장되거나 한 부재 내에서도 중첩되어 나타나며 이로 인해 파쇄가 진행 중이다(Figure 4A). 이러한 부재는 향후 탈락이 발생할 가능성이 높다. 또한 외부 구성부재에서는 석재의 배열 상태가 불량하여 불균형적인 상태를 보이기도 한다(Figure 4B). 탈락은 석빙고 구성부재 전반에 걸쳐 발생하였으며 주로 부재의 가장자리에 다양한 크기의 결실이 확인된다(Figure 4C). 또한 부재 표면을 따라 미세한 균열이 발달하면서 층상의 박락이 발생한 부재도 다수 관찰된다(Figure 4D).

작성된 훼손지도를 살펴보면 균열과 이격은 내부 부재에 전반적으로 나타나나 홍예 구성부재에서 현저하게 발달하였다. 이는 홍예 구성부재가 압축력을 강하게 받는 구조재이기 때문이다. 홍예 부재의 균열은 응력의 전달방향과 동일한 방향으로 발달한 반면 이격은 압축력의 수직 방향으로 발달하여 응력의 축이 비틀리면서 전단력이 발생하여 이격이 일어났을 가능성이 있다. 탈락은 홍예의 천장 부분에서 집중적으로 발생하였으나 박락은 전반적으로 균일한 분포를 보인다(Figure 5). 이들의 훼손 양상을 각각의 손상요인에 따라 정량적인 도면을 작성하여 하나의 도면으로 종합하면 Figure 5와 같다.

Table 1. Classification scheme of weathering forms.

Group of weathering form	Weathering form	Description
Physical deterioration	Crack	Cracks in the individual store blocks due to natural or constructional causes.
	Disjoining	Gaps between stone blocks due to shifts from the original position of the store components.
	Break-out	Loss of compact stone fragments due to natural or unnatural causes.
	Exfoliation	Loss of store material on the store surface due to exfoliation.
Discoloration	Efflorescence	Poorly adhesive deposits of salt aggregates on the stone surface.
	Brown discoloration	Brownish alteration of the original stone color due to chemical weathering of minerals, accumulation of coloring matter, soil or staining by dust.
	Dark-gray discoloration	Dark-gray alteration of the original stone color due to chemical weathering of minerals, accumulation of coloring matter, soil or staining by dust.
	Biological discoloration	Discoloration due to colorization by microorganisms (fungi, algae, lichen) and bacteria.



Figure 4. Occurrence of individual weathering forms in the Gyeongju Seokbongp. (A) Cracks of an interior arch store. (B) Disjoining due to irregular array between rock blocks. (C) Breaking-out of an arch store. (D) Exfoliation parallel to the store surface. (E) Efflorescence on the arched ceiling. (F) Considerable brown and dark-gray discoloration around the ventilation ducts. (G) Distribution of biospecies on the north wall during summer. (H) Distribution of biospecies on the north wall during winter. (I) Different distribution of biological colorization between lightened and shaded area.

#### 4.2. 변색에 의한 훼손

이 석빙고에서 관찰되는 주된 변색 현상은 백화현상, 갈색 변색, 암흑색 변색 및 생물에 의한 변색이다. 백화현상은 빗물이나 지하수에 용해되어 있던 가용성 무기염류가 석출되어 석재 표면에 고체상의 회백색 분말 및 피각물질을 형성하는 것을 말한다. 경주석빙고 내부에서는 부재 사이나 균열된 틈으로 유수의 흔적을 따라 천정을 비롯한 거의 모든 벽면에서 이와 같은 백화현상이 관찰되었다(Figure 4E). 갈색 변색과 암흑색 변색은 거의 모든 부재에 걸쳐 매우 광범위한 발생 양상을 보여준다. 또한 환기구 주변에 집중적으로 나타난다(Figure 4F).

내부의 북벽은 거의 전면에서 토양과 함께 2~5mm 정도의 두꺼운 피막을 형성하며 하등식물이 군집을 이루고 있었다(Figure 4G). 하등식물에 의해 피복된 표면은

주로 짙은 녹색을 띠었으며 부분적으로 백색의 곰팡이가 반점상으로 관찰되기도 한다. 생물에 의한 변색은 석빙고 내부의 환경적 문제점을 극단적으로 보여주는 것으로서 계절 변화 및 빛의 조사 방향에 따라 발생 양상을 달리한다.

북벽의 경우 8월에는 생물 군체가 거의 전면을 피복하고 짙은 녹색을 띠며 활발히 성장하는 모습이 관찰되었으나(Figure 4G), 1월에는 피도가 현저하게 감소하였고 색상도 옅은 갈색으로 변화하였다(Figure 4H). 또한 조명이 조사되는 양지 영역과 음지 영역 간에는 큰 차이를 보였다(Figure 4I). 이는 근본적으로 온도, 습도 및 빛에 따른 생물군집의 활성도 변화 때문이다.

종합훼손지도를 살펴보면 백화현상은 유수가 가장 심한 북쪽의 홍예석에서 훼손이 더욱 심각한 반면 환기구와 남쪽 입구 주변에서는 상대적으로 낮은 피도를 보인다.

갈색 및 암흑색 변색은 벽면의 저부보다는 천정의 환기구 주변에서 높은 피도를 보이며 두 변색은 중첩되어 발생하고 있다. 따라서 갈색 및 암흑색 변색은 공기 중의 부유 미세분진이 공기의 유출입을 따라 주변 부재 표면에 침적되면서 색도가 다양한 변색을 야기하는 것으로 판단된다. 생물에 의한 변색은 출입구가 가까운 동서벽의 남쪽 방향

과 조명광이 수직으로 조사되는 북벽에서 높은 분포도를 보인다(Figure 5).

다양한 변색 현상 중 백화현상을 야기하는 백색 오염물을 소량 채취하여 주사전자현미경 관찰을 실시한 결과 도변상 석고와 능면상의 방해석이 관찰되었다(Figure 6A, 6B). X-선 회절분석에서는 석고와 방해석이 다량 검출되

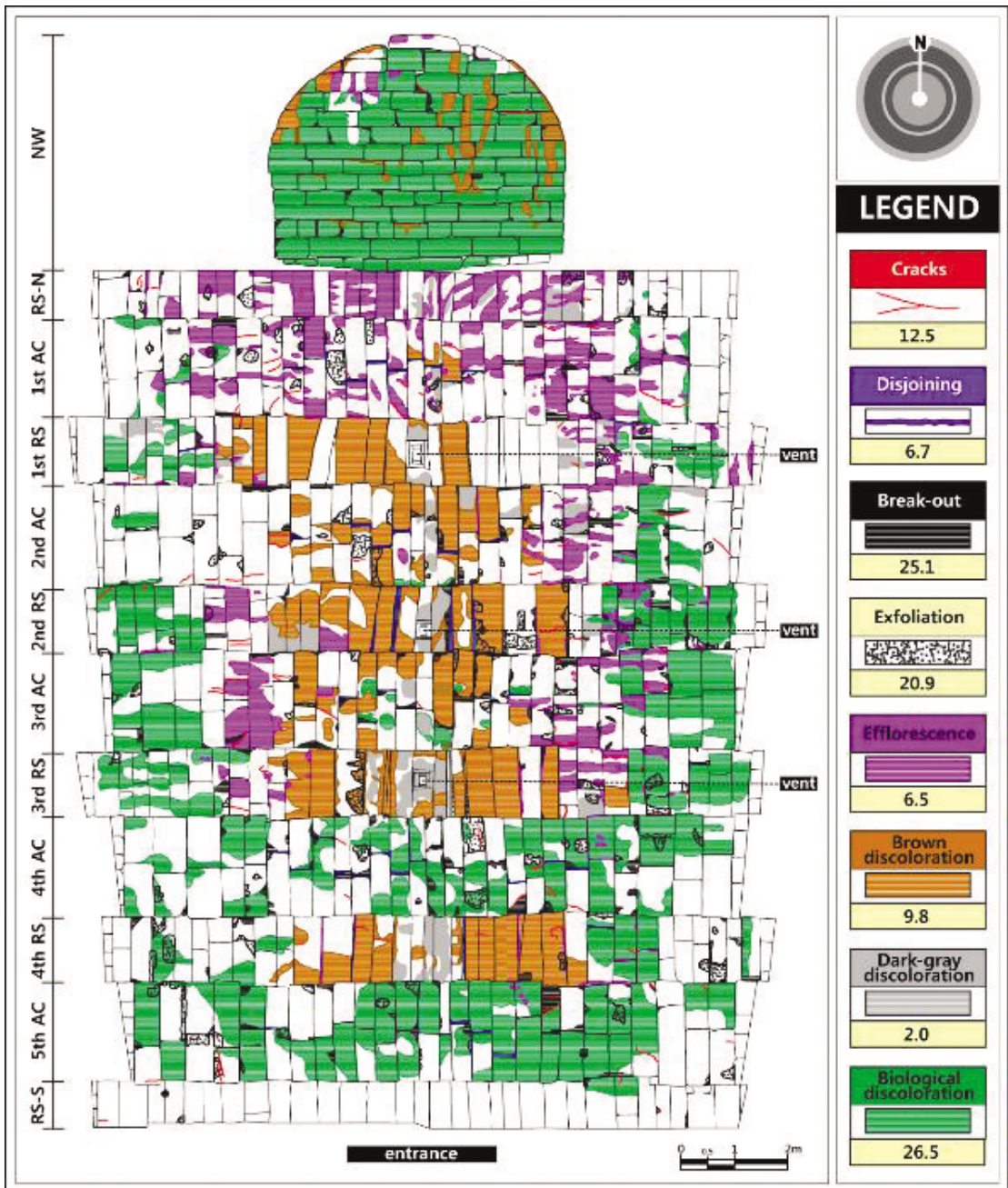


Figure 5. Comprehensive deterioration map of the Gyeongju Seokbinggo.

었으며 토양의 혼입으로 인한 석영과 사장석이 동정되었다(Figure 6C). 방해석과 석고는 주로 무색 또는 백색을 띠고 유리광택을 가진 탄산염 및 황산염 광물로서 암석 내의 칼슘 또는 시멘트 모르타르나 강회 같은 석회질 물질과 대기가스가 용해된 물과의 반응으로부터 생성된다.

석고와 방해석은 수용액 상태로 존재할 때에는 문제를 일으키지 않으나 수용액이 과포화되어 열결정이 석출되면 결정화 압력이 발생하여 이 압력이 암석의 인장력을 초과할 때 암석의 물리적인 파쇄가 일어난다. 결정화 압력은 염의 포화도, 기공의 크기, 기공벽의 표면장력 등에 의존하며<sup>8, 10, 20</sup> 특히 정동이 발달한 알칼리화강암은 염수용액이 기공 내로 쉽게 흡수될 수 있어 염공화의 가능성이 충분히 잠재되어 있다. 경주석빙고의 백화현상은 근본적으로 강수 및 지하수의 침투와 석빙고 상부 봉토에 시공된 강회다짐이 그 원인으로 판단된다.

### 4.3. 종합훼손도 평가

경주석빙고의 내부에서 균열이 발생한 부재는 전체 712개의 내부 표면 부재 중 총 89개로 12.5%의 훼손율을 보였다. 세부적으로는 홍예를 1번과 홍예를 2번에서 각각 25.4%와 22.6%의 높은 훼손율을 나타냈다. 이는 구조적인 취약성으로 이어져 석빙고의 안정성에 위협을 가할 수 있는 요소가 된다(Table 2, Figure 7). 이격은 홍예를 4번과 1번에서 각각 29.2%, 18.8%로 최대 훼손율을 보였으며 이격이 진행될 경우 홍예구조의 붕괴를 초래할 수 있기 때문에 거동 여부를 확인하기 위한 모니터링이 필요할 것으로 판단된다(Table 2, Figure 7). 또한 균열과 이격의 발생 비율이 모두 높은 홍예를 1번에 대해서는 추가적인 정밀진단이 요구된다.

탈락 훼손율이 높은 곳은 홍예를 4번(40.3%), 홍예를 5번(39.3%), 홍예를 2번(37.1%) 및 홍예를 3번(34.9%)으로 공통적으로 홍예를 구성부재이다. 따라서 홍예간석보다는 구조재의 역할을 하는 홍예를 구성부재에서 더 많은 물리적인 훼손 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 바리바락은 홍예를 2번에서 훼손율이 38.7%로 가장 높았으나 특정 구간에 훼손이 집중되지는 않았다(Table 2, Figure 7).

백화현상은 북벽간석과 홍예를 1번에서 각각 28.2%와 19.5%로 가장 우세하게 나타났으며 이는 육안조사에서도 확인되었듯이 북쪽에서 우수 및 강수의 침투가 심하기 때문이다. 적갈색 변색은 홍예간석 2번(24.7%), 홍예간석 3번(26.4%), 홍예간석 4번(26.4%)에 집중적으로 나타나는 데 모두 환기구가 설치된 부분이다. 암흑색 변색 또한 적갈색 변색과 마찬가지로 홍예간석 1번과 홍예간석 2번에 각각 5.6%와 6.9%로 가장 높은 훼손율을 보여 이러한 변색이 공기 중의 미세분진에 의한 영향일 가능성을 보여준다. 생물에 의한 변색은 북벽에서 85.0%의 피도를 보여 가장 심각하며 특히 입구로 갈수록 피도가 점차 증가하였다(Table 2, Figure 7).

훼손도 평가를 종합할 때 경주석빙고에서 가장 높은 훼손율을 보인 유형은 탈락과 생물에 의한 변색이다. 내부의 구성부재 중 물리적으로 훼손된 부재의 비율은 43.7%, 변색으로 훼손된 부재는 68.7%로 나타났다. 또한 위치별로 물리적인 훼손은 홍예를 구성부재에서, 변색은 홍예간석에서 높은 발생비율을 보였다. 훼손이 육안으로 관찰되지 않는 부재는 전체의 22.1%에 불과하여 경주석빙고의 훼손 상태가 매우 심각함을 보여준다(Table 2, Figure 7).

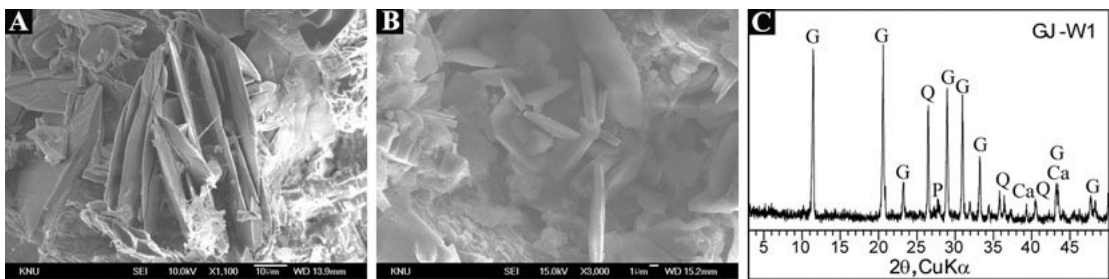


Figure 6. Scanning electron microscopic (SEM) images and X-ray diffraction patterns of white precipitates. (A) Bladed gypsum. (B) Rhombohedral calcite. (C) X-ray powder diffraction patterns of white precipitates. Q: quartz, P: plagioclase, G: gypsum, C: calcite.



Table 2. Quantitative deterioration rate. Cr: Crack Dj: Disjoining, Bo: Break-out, Ex: Exfoliation, Ef: Efflorescence, BrD: Brown discoloration, DrD: Dark-gray discoloration, BID: Biological discoloration, PD: Physical deterioration, DC: Discoloration

Location	Deterioration rate (%)										
	Cr	Dj	Bo	Ex	Ef	BrD	DrD	BID	PD	DC	Total
NW	2.8	0.0	24.8	0.0	1.4	9.5	0.0	85.0	24.8	97.2	97.2
RS-N	6.7	0.0	13.3	17.8	28.2	0.2	5.1	0.1	31.1	66.7	77.8
1st AC	25.4	14.3	22.2	28.6	19.5	1.2	0.7	3.6	58.7	79.4	79.4
1st RS	13.2	1.9	18.9	9.4	5.2	2.1	5.6	10.9	35.8	71.7	73.6
2nd AC	22.6	9.7	37.1	38.7	3.7	15.2	3.5	7.0	69.4	77.4	85.5
2nd RS	10.0	8.0	16.0	34.0	7.5	24.7	6.9	24.7	42.0	78.0	82.0
3rd AC	15.9	6.3	34.9	34.9	10.7	13.5	0.8	24.5	57.1	71.4	85.7
3rd RS	15.4	1.9	19.2	19.2	5.9	26.4	0.7	21.4	40.4	80.8	86.5
4th AC	11.3	22.6	40.3	24.2	0.5	0.0	0.0	36.5	56.5	46.8	71.0
4th RS	10.9	3.6	10.9	20.0	1.4	26.4	3.9	14.7	36.4	52.7	67.3
5th AC	9.8	11.5	39.3	26.2	0.4	0.0	0.0	52.9	52.5	63.9	78.7
RS-S	10.8	0.0	10.8	8.1	0.0	0.0	0.0	2.9	16.2	5.4	18.9
Total	12.5	6.7	25.1	20.9	6.5	9.8	2.0	26.5	43.7	68.7	77.9

NW: North wall, RS-N: Rock series next to north wall, 1st AC: 1st rock series between 1st AC and 2nd AC, 2nd AC: 2nd arched wall, 2nd RS: 2nd rock series between 1st AC and 2nd AC, 3rd AC: 3rd arched wall, 3rd RS: 1st rock series between 1st AC and 2nd AC, 4th AC: 4th arched wall, 4th RS: 1st rock series between 1st AC and 2nd AC, 5th AC: 5th arched wall, RS-S: Rock series next to south wall.

## 5. 미기후환경 분석

### 5.1. 연중변화

훼손도 평가 결과, 경주석빙고의 훼손 상태가 온습도, 수분환경 및 빛에 따라 다른 양상을 보임에 따라 이에 영향을 미치는 석빙고 내외부의 미기후 요소를 분석하였다. 외부의 상대습도와 온도는 경주시 농업기술센터에서 제공하는 '경주시 기상 자료'를 참고하였다. 2004년 8월 22일부터 2005년 8월 21일까지 측정된 기온과 상대습도의 일평균은 석빙고 내부에서 64.9~99.9%, 외부에서 21.0~99.0%의 범위에 분포하는 것으로 나타났다.

석빙고 외부의 상대습도와 기온은 우리나라의 계절 변화에 따라 전형적인 기후 특성을 나타냈으나, 내부의 상대습도는 4월 이후부터 일정하게 99% 이상을 유지하고 있어 석빙고 실내가 매우 다습한 상태임을 알 수 있다. 또한 내부의 상대습도는 증가와 감소가 서서히 일어나는 반면 외부는 일조량, 강우량 및 풍속 등의 영향으로 증감 변동이 크게 나타났다. 기온은 내부가 0.2~21.0℃, 외부가 -6.8~29.4℃의 범위에 나타났으며 기온 또한 내

부의 증감폭이 외부보다 현저히 작아 내부가 비교적 안정된 실내 환경을 유지하고 있는 것으로 판단된다(Figure 8).

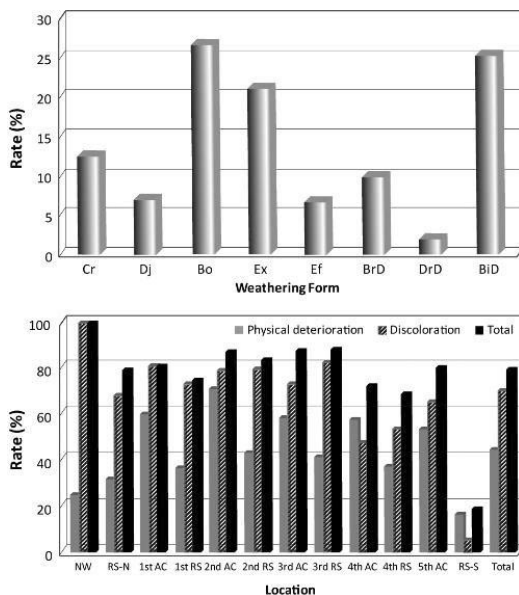


Figure 7. Comprehensive deterioration rate of the Gyeongju Seokbinggo. Abbreviations are the same as in Table 2.

5.2. 계절변화

경주석빙고 내외부의 계절별 상대습도와 기온의 평균 값을 Table 3에 정리하였다. 석빙고 내부의 평균 상대습도는 모든 계절에서 평균 80% 이상으로 외부보다 높은 반면 기온은 봄과 여름에는 내부가 낮고 가을에는 거의 유사하다가 겨울에는 외부가 더 낮아지는 변화를 보였다. 내부 상대습도의 표준편차는 여름철에 0.2로 가장 낮고 겨울철에 8.9로 가장 높아 여름철에는 상대습도 변동이 매우 작고 겨울철에는 크다는 것을 알 수 있다. 그러나

여름철에는 평균 상대습도가 99.7%로 매우 높기 때문에 실내에 수분의 증발이 거의 일어나지 않음을 예측할 수 있다(Table 3).

모든 계절에서 공통적으로 상대습도와 기온의 표준편차가 내부보다 외부에서 더욱 크게 산출되어 외부의 기후 변화에 대해 내부는 상대적으로 변화가 작은 것으로 판단된다. 계절별로는 겨울철의 변동이 심하게 나타났다. 내부의 미기후 변동은 근본적으로 외부 기후의 변동에 의한 것이나 변동폭에서는 큰 차이를 보여 석빙고의 구조가 외부의 급격한 환경변화에 대해 완충 작용이 있는 것으로

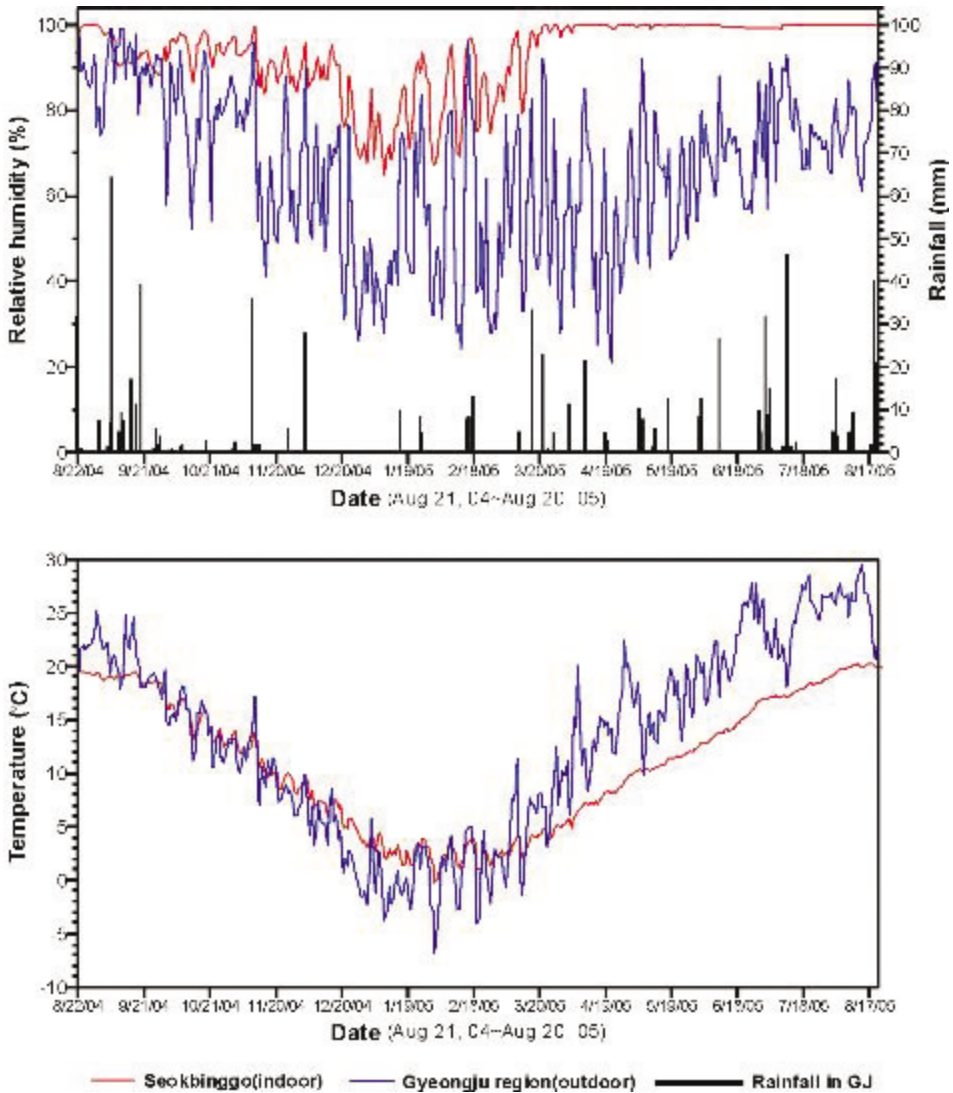


Figure 8. Yearly microclimate of the Gyeongju Seokbinggo.

판단된다.

계절별로 내부의 상대습도 분포를 살펴보면, 봄과 여름에는 98~100% 범위에서 현저하게 우세한 빈도를 보였으며 봄철이 여름철보다 분포범위가 넓다. 가을에는 88~100% 범위에서 균등한 분포를 보였다. 겨울은 56~100%의 매우 넓은 범위에 균일한 분포를 보였다. 따라서 경주석빙고 실내의 높은 상대습도는 봄과 여름에 집중적으로 나타남을 알 수 있다(Figure 9). 기온은 봄에는 1℃~13℃에 균일하게 분포하였으며, 여름에는 12℃~21℃, 가을에는 5℃~20℃, 겨울에는 -2℃~11℃의 분포 범위를 보여 계절별로 고유한 분포 범위를 보여주고 있다. 기온은 여름과 가을에 높고, 봄과 겨울에는 낮은 것으로 나타나 상대습도와는 다른 특성을 보인다(Figure 9).

### 5.3. 결로발생 가능성

높은 상대습도를 유지하고 있는 석빙고 내부에서 벽면에 결로 발생 여부를 확인하기 위해 습도가 가장 높은 지점으로 판단되는 북벽 표면에 NTC 온도 센서를 부착하여 표면온도를 측정하였다. 2005년 9월 13일부터 9월 26일까지 공기의 이슬점과 표면온도는 기온과 상대습도의 변화에 따라 증감하였으며 대체적으로 매우 근사한 값을 보여준다. 또한 9월 16일과 17일, 9월 25일, 26일에 이슬점이 상승하면서 표면온도가 이슬점 이하로 떨어지는 날이 관찰되었다(Figure 10).

이는 이론적으로 표면의 결로 발생을 의미하며 석빙고 내부에 형성되어 있는 수분의 기원 중 하나로 결로 현상이 기여하고 있음을 입증한다. 결로는 경주석빙고와 같이

가공과 표면 요철이 발달하고 이차적인 오염물이 피복되어 있을 경우에 실제 측정된 표면온도보다 더 높은 온도에서 발생할 수 있다.<sup>21</sup> 이와 같은 현상은 차후 상세하게 보고할 예정이다.

## 6. 보존과학적 고찰

경주석빙고에서 가장 높은 훼손율을 보인 유형은 생물에 의한 변색이다. 하등식물이 균집을 형성하고 생장하기 위해서는 물, 영양분 및 빛이 필수적으로 요구된다.<sup>22</sup> 석빙고 내부 지반에서는 강우가 발생하고 3일이 경과한 이후에도 지속적인 유수가 발생하였으며, 미기후 분석을 통해 벽면의 결로 현상도 확인되었다. 또한 석빙고 외부의 북쪽 사면에서는 봉토 일부가 유실되어 내부 구성석재가 노출된 것이 확인되었다.

따라서 지하수, 강수의 누수 및 결로수가 석빙고 내부의 주요한 수분 공급원으로 판단된다. 이 수분은 내부의 상대습도를 높여 수분의 증발을 방해하기 때문에 부재 표면에 장기간 정체하면서 미생물의 생장과 신진대사에 필요한 수분을 지속적으로 공급한다. 또한 조명이 조사되는 지점에서 생물 피도가 높은 것으로 미루어 석빙고 내부의 나트륨 조명이 식물의 광합성에 필요한 빛을 충분히 공급한 것으로 판단된다.

석빙고 내부의 누수는 구성부재의 화학적 풍화는 물론 지반 토양의 함수량 변화와 토양 유실을 야기하여 지반 형태를 변형시킴으로써 구조적인 문제를 더욱 확대시킬 수 있을 것으로 보인다. 이는 경주석빙고 홍예틀에 발달

Table 3. Mean, maximum, minimum and standard deviation of daily mean relative humidity and temperature of the Gyeongju Seokbinggo.

Remarks	Spring		Summer		Autumn		Winter		
	in	out	in	out	in	out	in	out	
RH (%)	mean	97.7	57.0	99.7	73.7	92.9	78.5	81.8	52.1
	max	99.9	92.0	99.9	93.0	99.8	99.0	97.2	96.0
	min	79.2	21.0	99.1	56.0	83.9	41.0	64.9	24.0
	$\sigma$	4.9	16.2	0.2	9.1	3.9	14.5	8.9	18.0
T (°C)	mean	7.4	11.8	17.1	23.9	14.9	15.0	3.9	1.6
	max	12.4	22.5	20.3	29.4	19.5	24.8	9.9	9.9
	min	2.0	-1.4	12.6	16.3	8.1	6.0	-0.2	-6.8
	$\sigma$	3.2	5.7	2.4	3.2	3.5	4.8	2.4	3.4

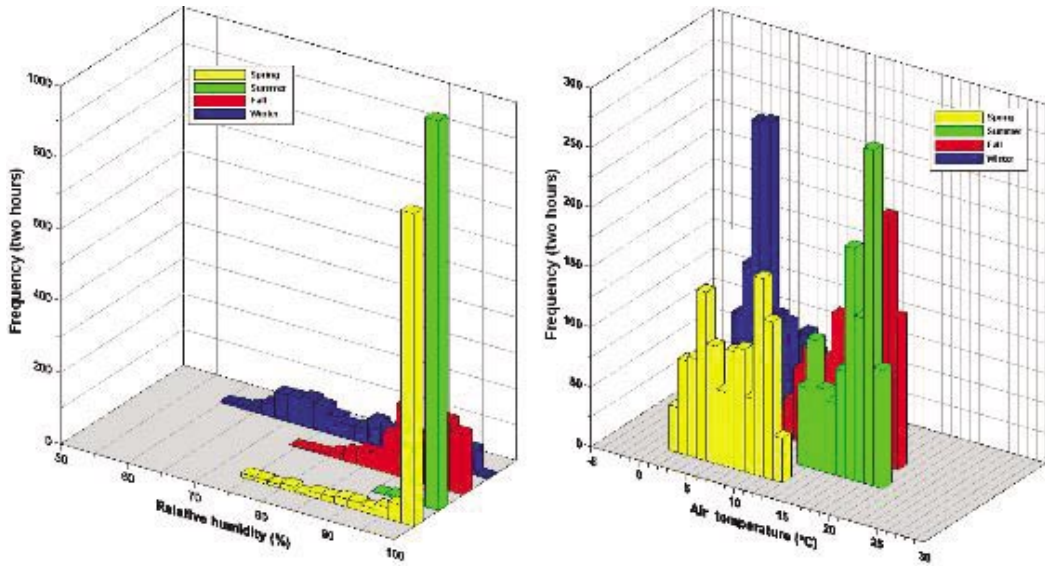


Figure 9. Seasonal variation of relative humidity and air temperature in the Gyeongju Seokbinggo.

된 균열과 탈락 현상에 영향을 미칠 수 있는 요소이다. 또한 유수에는 미세한 토양 입자, 규조토, 대기오염 물질 및 가용성염 등이 포함되어 있다. 토양 입자는 부재 표면에 미소토양을 축적시켜 수분유지 시간을 장기화시킬 뿐만 아니라 생물의 착생과 증식에 최적의 환경을 조성해준다. 가용성염은 백화현상을 일으키는 주된 원인이다.

강수의 누수를 막기 위해서는 봉토의 토층과 허부의 강화다짐층을 재정비해야 한다. 강회는 전통적으로 지하에서 올라오는 습기를 막기 위한 기초공사나 흙의 유실을 방지하기 위해 기단공사에 적용되었다. 또한 단열효과와 습도 조절을 위해 벽체 미장에도 이용하였고, 벽화의 채색 말바탕재로도 사용되었다.<sup>23</sup> 그러나 사공 과정에서 충분한 소화반응이 진행되지 않았을 때에 강도가 저하되며 내수성이 떨어진다.<sup>24</sup> 따라서 문화재에 적용 시에는 전문가에 의한 정밀한 사공과 주의가 요구된다. 또한 추가적인 방수층을 사공하는 것도 효과적인 치수 방안이 될 수 있을 것이다.

한편 석빙고 입구 전면에 조성된 사질토양에서 발생한 비산 먼지는 식물의 포자, 화분, 분진 및 대기오염 물질 등을 함유하여 공기의 유동과 함께 석빙고 내부로 유입되면서 구성부재의 표면에 변색을 일으키고 허등식물종의 도입을 유발하였다. 갈색 및 암흑색 변색이 환기구 주변에 현저하게 발생한 것은 이 부분이 공기의 유출입로이기

때문이다. 따라서 입구 전면의 사질토양을 부유하지 않는 물질로 대체하여야 한다.

## 7. 결론

1. 경주석빙고(보물 제66호)는 조선시대의 얼음 저장창고로서 구성재질은 알칼리화강암, 흑운모화강암, 미문상화강암, 반화강암, 세립질화강암 등이며 드물게 안산암질암, 세일질 호른펠스, 응회암 등이 다양하게 혼용되었다. 이 중 가장 높은 점유율을 보이는 것은 알칼리화강암으로 경주 남산 일대에 분포하는 남산화강암과 유사하다. 전체적으로 정동이 발달하고 유백색의 밝은 색조를 띠며 중립질의 석영, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석 등으로 구성된다.
2. 종합훼손도 평가 결과, 균열과 이격은 12.5%와 6.7%의 훼손율을 보였으며 주로 북쪽의 흉예를 부재에 집중적으로 발생하였다. 탈락과 박락의 훼손율은 25.1%와 20.9%로 산출되었으며 전반적으로 균일한 분포를 보였다. 백화현상은 6.5%로 유수가 삼한 부분에서, 갈색 및 암흑색 변색은 각각 9.8% 및 2.0%로서 환기구 주변에서 현저히 나타났다. 생물에 의한 변색 훼손율은 26.5%이며 수분과 빛이 공급되는 지점에서 높은 피도를 보였다. 이를 종합할 때 물리적인 훼손율은 43.7%, 변

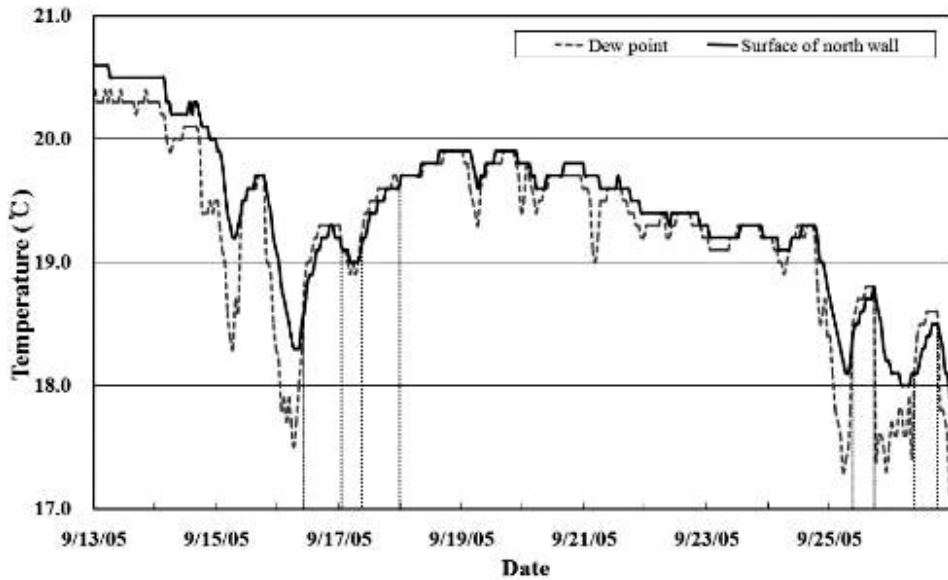


Figure 10. Dew point and surface temperature of the Gyeongju Seokbinggo.

색에 의한 훼손율은 68.7%로 산출되어 석빙고의 훼손 상태가 매우 심각함을 알 수 있다.

3. 미기후 분석 결과, 석빙고 내부는 겨울철을 제외하고 연중 90% 이상의 높은 상대습도를 유지하였으며, 내부 미기후는 외부 기후 변화에 의존하나 외부보다 변동이 현저히 적은 일정한 환경을 유지하고 있었다. 여름철에는 내부 미기후 변동이 작고 겨울철에는 크게 나타났으며 상대습도의 분포는 봄과 여름에 98~100%에 최빈값을 보여 생물에 의한 변색 훼손도가 증가하는 것으로 해석된다. 한편 내부 부재 표면에서 결로 현상이 확인되었다.

4. 경주석빙고 훼손의 근본적인 요인은 내부의 높은 상대습도와 장기적인 수분 유지시간으로, 이는 강수와 지하수의 유입, 부재 표면의 결로 현상에 기인한다. 수분은 생물에 의한 변색, 부재의 재질약화, 구조체의 거동, 백화현상 등을 야기하고 부재 표면에 토양을 축적시킨다. 또한 입구 전면의 사질토양은 분진 입자를 내부로 유입시켜 갈색 및 암흑색 변색을 가중시켰다.

5. 석빙고의 주요 훼손 요인인 수분을 근원적으로 차단하기 위해서는 봉토의 토층과 강화다짐층을 재정비해야 하며 상부로부터 강수의 직접적인 누수를 차단하고 주변으로 유도 배수로를 설치하여 내부로 지하수 침투를 막아야 한다. 환경적인 문제점이 해결된 이후에는 구성부재의 과학적 보존처리를 통해 부재의 내구성을 증강시켜야 한다.

## 사 사

이 연구는 2008년도 문화재청 국립문화재연구소의 연구개발사업인 “석조문화재 손상메커니즘 및 평가기술 개발”의 일환으로 수행되었음을 명기하며, 행정적 및 재정적 지원에 깊이 감사한다.

## 참고문헌

1. 문화재관리국, “한국의 석빙고”. 문화재관리국, p3-45, (1994).
2. 공성훈, 조국환, “경주 석빙고의 여름철 실내환경 조건에 관한 연구”. 한국전통과학기술학회지, 4, p49-58, (1998).
3. 배연경, “열유체 수치해석에 의한 환경·에너지 시스템 연구”. 충남대학교 환경공학과 석사학위논문, p69-79, (1999).
4. 진홍섭, “현풍 석빙고”. 미술사학연구, 9, p88-99, (1961).
5. 진홍섭, “경주 석빙고의 축조연대”. 이대사원, 5, p1-13, (1964).

6. 신동수, "석빙고의 전열해석". *산업기술연구소논문보고집*, 2, p9-15, (1980).
7. 김수진, 이민성, 김원사, 이수재, "서울지역의 자연환경 변화에 관한 연구: 남산화강암의 풍화에 관한 환경 광물학적 연구". *지질학회지*, 30, p284-296, (1994).
8. 김영화, 홍순호, "풍화현상에 수반되는 화강암의 물성 변화에 관한 연구". *광산지질*, 23, p221-232, (1990).
9. Chesworth, W., "The major element geochemistry and the mineralogical evolution of granitic rocks during weathering". In Ahrens, L.H.(ed), *Origin and distribution of elements*, Pergamon Press, Oxford, p9305-313, (1971).
10. Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W., "Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea". *Environmental Geology*, 47, p547-557, (2005).
11. 최석원, 이찬희, 남광우, "회암사지 선각왕사비 보존: 선각왕사비의 암석학적 및 물리화학적 특성과 변화연구". 국립문화재연구소, p43-77, (2001).
12. Kim, J., Lee, C.H., Lee, M.S. and Jo, Y.H., "Quantitative deterioration assessment and environmental system of the Gyeongju Seokbinggo (ice-storing stone warehouse), Korea". *Proceeding paper of presented at the 2006 annual meeting of the Korea Society of Economic and Environmental Geology*, p511-514, (2006).
13. 도진영, "경주 석빙고 구성석재에 형성된 표면오염물의 특징과 그 제거방안". *제21회 한국문화재보존과학회 학술대회 발표논문집*, p71-88, (2005).
14. 윤윤경, "경주 석빙고 내부의 생물 분포에 관한 연구". *제21회 한국문화재보존과학회 학술대회 발표논문집*, p62-70, (2005).
15. Ishihara, S., "Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic granitic belts". *Resource Geology*, 48, p219-224, (1998).
16. 이준동, 황병훈, "경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구". *한국지구과학회지*, 20, p80-95, (1999).
17. 윤성효, 황인호, "경주 남산일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성". *한국지구과학회지*, 11, p51-61, (1990).
18. Cardell, C., Delalieux, F., Roumpopoulos, K., Moropoulou, A., Auger, F., Van Grieken, R., "Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France". *Construction and Building Materials*, 17, p164-179, (2003).
19. Benavente, D., Garcia del Cura, M.A., Garcia-Guinea, J., Sanchez-Moral, S., Ordoñez, S., "Role of pore structure in salt crystallisation in unsaturated porous stone". *Journal of Crystal Growth*, 260, p532-544, (2004).
20. Theoulaski, P., Moropoulou, A., "Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay". *Construction and Building Materials*, 11, p65-71, (1997).
21. Camuffo, D., "Microclimate for cultural heritage". Elsevier, Amsterdam, p1-415, (1998).
22. Warscheid, T. and Braams, J., "Biodeterioration of stone: a review". *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, p343-368, (2000).
23. 김진만, 박은구, 서만철, 조현영, "전통 건축물 석회 다짐층 보수 시공시의 문제점 및 개선방안". *제15회 한국문화재보존과학회 학술대회 발표논문집*, p21-31, (2002).
24. 최준오, 임병훈, "건축재료학". 도서출판 서우, 서울, p336, (2002).