

ARTICLE

# 기후변화와 지류·직물 문화유산의 보존을 위한 영향과 과제에 관한 연구

김지수\*

## A Study on the Impacts and Challenges of Climate Change and Conservation of Paper and Textile Heritage

Kim, Jisoo\*

### 요지

지류·직물 문화유산은 소재 특성상 보존환경에 매우 취약하고 미미한 환경 변화에도 급속도로 손상될 수 있다. 본 연구는 국외 연구사례를 중심으로 기후변화가 지류·직물 유산에 미치는 영향과 전망을 고찰하고, 우리나라 유산의 보존을 위한 제언을 도출하였다. 지류·직물 유산과 같은 동산 문화유산의 보존과 밀접한 실내기후의 향후 전망을 분석한 결과에 따르면 21세기 동안 건물 내부 온도와 습도의 변화가 전망됨에 따라 필연적으로 실내에 위치한 유물 전반에 대한 손상이 예상되고 있다. 특히 지류·직물 유산의 화학적 손상과 관련하여 기온 상승 추세는 재료 열화율의 상당한 증가로 이어질 것이며 그에 따른 피해가 분명히 증가할 것으로 나타났다. 또한 기온 상승과 습도 변화 추세로 인해 가해생물들의 지리적 범위 확산, 개체군 및 세대 수 증가, 침입종 위험 증가가 이미 나타나고 있고, 향후 그 속도가 더욱 빨라질 것으로 예상됨에 따라 지류·직물 유산의 생물학적 손상 역시 심화될 전망이다. 우리나라의 지류·직물 유산의 기후변화 영향을 정량화하기 위해서는 다양한 유형별 건물의 실내기후 모니터링과 곰팡이·해충 모니터링을 필수적으로 이루어져야 할 것이다. 여기에 가해 곰팡이·해충종에 대한 실험실 연구를 뒷받침하여 미래 기후변화 영향 시뮬레이션 결과를 종합할 필요가 있다. 향후 우리나라 역시 기후변화에 의한 지류·직물 유산의 피해 증가가 전망된다는 점을 고려하여 효과적이고 친환경적인 총·균 제거 방법의 개발이 필요한 시점이다.

**핵심용어:** 기후변화, 지류·직물 문화유산, 영향, 기후변화 적응, 유기질 동산 문화유산

### Abstract

This study examines the impacts and prospects of climate change on paper and textile heritage, focusing on overseas researches, and derives suggestions for the preservation of Korean heritage. According to the analysis of the future prospects of the indoor climate, which is closely related to the preservation of movable cultural heritage including paper and textile heritage, damage to the entire cultural assets located indoors is inevitably expected as changes in temperature and humidity inside buildings are predicted during the 21st century. In particular, with respect to chemical damage of paper and textile heritage, the trend of temperature increase will lead to a significant increase in the degradation rate, and the resulting damage is clearly expected to increase. Due to the trend of temperature rise and humidity change, geographic expansion as well as the increase in the population and number of generations of harmful organisms, and the increase in the risk of invasive species have already occurred, resulting in intensifying the biological damage to paper and textile heritage further.

\* 정희원, 국립문화재연구원 안전방재연구실 연구원(E-mail: jskim025@naver.com)

Member, Researcher, Safety and Disaster Prevention Division, National Research Institute of Cultural Heritage

Received | August 15, 2023 Revised | August 24, 2023 Accepted | August 31, 2023



© 2023 Society of Cultural Heritage Disaster Prevention All rights reserved.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

in the future. In order to quantify the impact of climate change on paper and textile heritage in Korea, it is essential to monitor the indoor climate of various types of buildings and to monitor mold and pests. In addition, it is necessary to synthesize the simulation results of future climate change impacts by supporting laboratory studies on fungal and pest species. It is time to spur into developing effective and eco-friendly methods of insect and fungus removal considering that future damage to paper and textile heritage is expected to increase due to climate change in Korea.

**Keywords:** Climate change, Paper and textile heritage, Impact, Climate adaptation, Movable organic-based heritage

## 1. 서론

기후변화는 지진 등 자연재해, 환경오염, 무력충돌, 개발과 같은 기존의 문화유산 피해 원인을 넘어선 새로운 위협요인으로 부각되고 있다. 세계문화유산 중 ‘기후변화 및 심각한 기상이변’으로 인한 위협을 보고한 사례는 1980년대까지만 하더라도 1건에 불과했으나 2010년대에는 79건으로 급증하였다(Kim et al., 2021; UNESCO WHC, 2021). 우리나라도 2010년부터 문화재청과 국립문화재연구원을 중심으로 국가유산에 대한 기후변화 영향을 주시하고 있다(Jo et al., 2023). 하지만 현재 이루어지고 있는 논의의 중심에 있는 것은 야외에 노출된 부동산 형태의 문화유산으로, 실내에서 보관되는 지류·직물 등 동산 문화유산(이하 동산유산)은 상대적으로 조명 받지 못하고 있다. 그러나 기후변화가 급속도로 진행됨에 따라 우리 유산의 선제적 보호를 위한 확장된 논의를 더 이상 미룰 수 없는 시점이다. 특히 금속, 토기, 유리 등과 같은 무기질 소재에 비해 유기질 소재, 그중에서도 지류나 직물로 이루어진 동산유산은 소재 특성상 보존환경에 매우 취약하고, 작은 환경 변화에도 급속도로 손상될 수 있다는 점에서 기후변화로 인한 더욱 큰 위협에 직면해있다.

본 연구는 지류·직물 문화유산(이하 지류·직물유산)을 위협하는 기후변화의 영향과 우리 문화유산의 보존을 위한 향후 과제를 고찰하고자 한다. 이를 위해 먼저 지류·직물 문화유산을 비롯한 유기질 동산유산에 대한 기후변화 영향의 다양한 측면들을 고찰하였다. 그리고 그 중에서도 지류·직물 유산을 중심으로 기후변화 영향과 전망에 대한 연구동향을 분석하였다. 이를 토대로 하여 우리나라의 현 지류·직물 유산 보존관행 하에서 향후 유산의 선제적 보호를 위한 과제 및 제언을 도출하였다.

## 2. 기후변화와 유기질 동산유산에 대한 영향

### 2.1 국내외 연구동향

기후변화가 문화유산에 미치는 영향에 대하여 다양한 국내외 연구와 유산 피해사례들이 보고되었지만, 지류·직물 유산을 포함한 동산유산에 관한 것은 매우 적은 비중을 차지한다. 동산유산에 대한 영향을 처음 고려한 2007년 세계유산센터 보고서에서는 유기질 유산과 관련하여 기후변화로 인한 습도의 변화가 초래하는 (1) 유기물의 미생물 분해를 촉진하는 부영양화, (2) 홍수 증가로 인한 유기·무기물질의 침식, (3) 해충, 곰팡이, 균류, 침입종(흰개미 포함) 등에 의한 생물학적 공격에 따른 유기물질의 손상을 언급한 바 있다(UNESCO WHC, 2007). 당시까지만 해도 동산유산과 관련하여 습도 외의 기온, 바람, 계절성, 해안환경 등 다른 기후변화 요소에 대한 부분은 그리 알려지지 않았으며, 그러한 요소가 유기질 동산유산에 미치는 영향도 직접적인 측면밖에 고려되지 못하였다. 2008년 국제역사예술보존협회(International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, IIC) 총회에서도 실내 유산, 특히 박물관 소장품에 대한 기후변화 연구의 부족이 논의된 바 있다(Saunders, 2008). 최근의 주목할 만한 연구결과로는 동산유산을 포함한 여러 유형의 문화유산에 대한 기후변화 영향을 정리한 ICOMOS ‘기후변화와 문화유산’ 실무그룹(ICOMOS Climate Change and Cultural

Heritage Working Group, 이하 ICOMOS CCCHWG)의 보고서를 들 수 있다(ICOMOS CCCHWG, 2019). 이는 기존의 2007년 보고서 내용에 최신 연구결과를 보완한 것이다. 국내에서는 자연유산과 건조물, 유적 등 부동산 문화유산에 대한 기후변화 관련 논의가 최근 들어 활발히 이루어지고 있는 가운데(Kim et al., 2021; NRICH, 2022; CHA, 2023; Jo et al., 2023), 동산유산에 대한 고려의 필요성도 대두되고 있지만(NRICH, 2022) 이에 대한 실질적인 연구는 아직 미진한 상황이다.

## 2.2 우리나라 지류·직물유산과 관련된 기후변화 요인: ICOMOS CCCHWG의 논의를 중심으로

지류·직물유산과 기후변화에 관한 국내 논의가 부재한 상황에서 우리나라 지류·직물유산과 관련된 기후변화 요인으로 ICOMOS CCCHWG(2019)의 최신 연구성과에 기반한 13가지 요인을 논할 수 있다(Table 1). 이러한 요인들은 중위도 온대 계절풍 기후를 지니며 해양의 영향이 큰 반도에 위치한 우리나라의 지리적 환경 하에서 고려될 수 있는 것들로, 유물뿐 아니라 동산유산 보관시설 측면에서도 다양하고 복합적인 영향을 미칠 수 있다.

Table 1. Climate change impacts to movable heritage

Climate Change Impacts	Moveable Heritage (including Museums & Collections)
Increased Temperature	<b>Facilities</b> • Increased stress on HVAC systems in storage facilities • Increased space constraints due to more items requiring protection in storage facilities • Increased need for environmental controls in facilities/house collections • Increased insect pest problems <b>Collections (without appropriate climate controls)</b> • Increased rate of chemical decay • Increased stress due to fluctuations in environmental conditions
Changed Freeze/Thaw Cycles	<b>Facilities</b> • Surface cracking, flaking, and sugaring of building stone, masonry and spalling of brick due to increase in wet-frost • Greater structural damage due to fluctuating environment, causing cracks in building that allow more access for pests to invade and damage collections • Required changes in access roads/paths required, including changes in the historical topography • Drastic temperature fluctuations require more need for indoor climate control
Increased Water Vapour Content in the Air (leading to changes in relative humidity in combination with temperature change)	<b>Facilities</b> • Increased wear on HVAC systems, and energy use to stabilize drastic changes in humidity <b>Collections (without appropriate climate controls)</b> • Increased rusting/ corrosion of metals • Damage to paintings • Warping, cracking of wood • Damage to archival, paper, book, and photo collections • Increased risk of mould, especially organic collections • Increased salt damage to ceramics with humidity fluctuations • Increase in pest populations and infestation • Degradation of polymers, papers, films, and contemporary artworks • Accelerated deterioration of museum items exhibited outside
Increased Wind	<b>Collections</b> • Damage to wooden, paper, textile and organic objects from increased water loss from objects <b>Facilities</b> • Renovations required to accommodate increased wind load
Climate Influenced Wildfires	<b>Facilities</b> • Damage to storage facilities and contents • Increased strain on existing museum facility and staff due to increased advance preparation and salvage operations • Smoke damage, strain on HVAC systems; risk to staff health • Flash Flood risk post-fire in watersheds denuded of vegetation <b>Collections</b> • Damage to items and disassociation of materials and records during emergency evacuations • Loss of collections and records to fire • Smoke damage • Damage from water or fire retardant
Changes in Seasonality & Phenology	<b>Facilities</b> • Increased stress on buildings and materials due to increased range of temperature swings during seasonal transitions <b>Collections (without appropriate climate control systems)</b> • Increased stress on artefacts and materials due to increased range of temperature swings during seasonal transitions
Less Precipitation/ Drought	<b>Facilities</b> • Limited water supply for cooling, landscaping, other equipment • Reduced humidity stress on building (possible benefit) <b>Collections (without appropriate climate controls)</b> • Damage to wooden, paper, textile and organic objects from drying due to increased water loss from materials

**Table 1.** Climate change impacts to movable heritage (continued)

Climate Change Impacts	Moveable Heritage (including Museums & Collections)
Increased Precipitation and more intense Rainfall Events	<p><b>Facilities</b> • Potential leaks in collection storage areas and potential wetting of museum objects • Increased cracking associated with ground heave and subsidence; destabilization of buildings and pipes; basements or underground storage sites at increased risk of flooding • Staff at health risk from mould and toxic pollution from flooding • Damage to utilities, generators and electrical systems Staff at increased risk of exposure to unhealthy mould</p> <p><b>Collections</b> • Increased risk of mould, especially organic collections • Increased rusting/ corrosion of metals • Humidity damage to paintings • Warping and cracking damage to wood • Humidity damage to archival, paper, book and photo collections</p>
Acute Coastal, Estuarine & Freshwater Flooding Events	<p><b>Facilities</b> • Damage to items and disassociation of materials and records during emergency evacuations • Structural collapse from moving force of floodwaters, particularly from flash floods • Sewage backup and overflow leading to saturation and related flooding, contamination and damage • Walls implode from hydrostatic force of standing water • Damage to utilities, generators and electrical systems • Ingress of salts which lead to salt damage of buildings</p> <p><b>Collections</b> • Direct damage and destruction by floodwater • Increased rusting/ corrosion of metals • Increased risk of rot/ insect attack, mould and mildew • Swelling/distortion of absorbent objects (such as wood) due to wetting • Ingress of salts which lead to salt damage of objects</p>
Chronic Coastal, Estuarine & Freshwater Flooding & Inundation	<p><b>Facilities</b> • Increased cracking associated with ground heave and subsidence • Potential leaks in collection storage areas and potential wetting of museum objects</p> <p><b>Collections</b> • Increase risk of mould • Increase rusting/ corrosion of metals • Damage and destruction post-flood from humidity and moisture</p>
Intensified Storms, (including Hurricanes & Cyclones) and Storm Surge	<p><b>Facilities</b> • Damage to utilities, generators and electrical systems • Structural collapse from moving force of storm surge • Changes to surrounding landforms or vegetation, which may affect future drainage</p> <p><b>Collections</b> • Damage to items and disassociation of materials and records during emergency evacuations • Risk of rot, fungal/ insect attack, mould and mildew • Rusting/corrosion of metals</p>
Increased Coastal Erosion	<p><b>Facilities</b> • Limited storage capacity to protect growing numbers of at-Risk artefacts</p>
Rising Water Table	<p><b>Facilities</b> • Potential for higher water vapour in air surrounding collections in storage areas • Increased risk of rising damp/rot from higher water tables</p> <p><b>Collections</b> • Damage to statuary (from capillary action and rising damp), organic materials, etc. in basements and crypts</p>

\*Sources: ICOMOS Climate Change and Cultural Heritage Working Group (CCCHWG), 2019, The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action, ICOMOS, Paris: France.

ICOMOS CCCHWG의 논의는 기후변화가 다양한 경로를 통해 지류·직물을 비롯한 동산유산의 보존에 직·간접적으로 미치는 영향을 아우르고 있다. 즉, 변화하는 기후조건이 유산의 보존에 직접적·물리적으로 미치는 영향, 생태환경의 변화로부터 유발되는 영향뿐 아니라 그것이 당해유산 및 보관시설 주변 지형환경, 자연재해, 재난위험관리(DRM) 운영 등에 미치는 영향, 거기에서 유래되는 유물에 대한 2차적인 영향도 포괄한다.

동산유산과 관련하여 ICOMOS CCCHWG 논의의 특징적인 점은 기후변화 영향을 받는 대상으로서 당해유산(유물)에 그치지 않고, 이를 보관한 유물보관시설이 받는 기후변화 피해양상을 세분화하고 있다는 것이다. 동산유산은 많은 경우 박물관, 수장고와 같은 시설 내에 보존되는 경우가 많아 옥외 기후변화 영향에 대한 직접적인 노출은 적다. 그러나 유물의 보존수명은 보존시설 내 온도, 습도, 빛 등을 제어하는 공조장치 등 보존환경의 질적 수준과 직결되어있으며(Park, 2004; Jung et al., 2016), 보관시설에 생기는 문제가 곧바로 유산의 손상으로 이어질 수 있다. 가령 2023년 5월 이탈리아에서 폭우로 인한 하천범람으로 인해 세계유산으로 지정된 도서관 내 필사본과 고서가 침수 피해를 입은 사례를 들 수 있다(Hughes, 2023). 피해 원인은 당시 수개월 지속된 극심한 가뭄 후 발생한 이례적인 폭우로, 토양 속 수분침투가 어려워 빗물이 하천범람으로 직결된 것에서 비롯되었다(Bunyan, 2023; Redazione ANSA, 2023). 2022년 8월 서울지역 역대 최고 강우량을 갱신한 폭우로 인해 서울대학교 중앙도서관이 침수되어 약 10만 권의 장서가 훼손된 국내사례도 있다(Kim,

2023). 여기에는 1868년부터 2000년대까지 출판된 국내외 학술지뿐 아니라 서울대에서만 소장 중인 도서 등 필수보존자료가 포함되어 있었다(Ahn, 2022). 침수피해가 발생했던 도서관 건물은 2015년 준공된 신축건물로, 평소 물이 차지 않는 중앙도서관 터널이 이례적으로 높은 강수량으로 인해 침수돼 아래층으로 누수가 발생했기 때문에 밝혀졌으며(Ahn, 2022), 전기설비 침수로 인한 정전이 더해지면서 홍수 직후 중요도가 높은 고서의 긴급대피에 차질이 생겼다(Kim, 2023). 이러한 예들은 유물보관시설과 유물에 대한 기후변화의 영향이 일부 제한된 곳에서만이 아니라 예상치 못한 일시와 장소에서도 충분히 발생할 수 있음을 시사한다.

### 3. 지류·직물 유산에 대한 기후변화 영향과 전망

#### 3.1 실내기후의 변화

그동안 다른 유형의 유산에 비해 동산유산에 대한 국내외 기후변화 대응이 소홀했던 데에는 동산유산의 대다수가 실내에 위치하며, 특히 공조장치가 잘 갖춰진 박물관이나 수장고에 보관되므로 기후변화의 직접적 영향에 대한 상대적인 노출도가 꽤 낮다는 인식이 자리한다. 그 결과 박물관의 미기후 또는 박물관 해충 자체에 대해 연구된 바는 많으나 대다수가 기후변화를 고려하고 있지 않는다(Querner et al., 2022).

하지만 실상은 공조장치가 있는 건물에서조차 기후변화로 인해 실내기후가 불안정함이 확인되고 있다(Camuffo et al., 2001). 그러나 급속도로 심화되는 기후변화로 인해 더욱 일정한 실내기후 조절이 필요해진 이 시점에 동산유산을 소장한 모든 건물과 기관이 엄격한 실내기후 조절을 할 수 있는 것도 아니며, 설사 그렇다고 해도 운영과정에서 종종 높은 에너지 수요와 비용이 수반된다(Ankersmit et al., 2017). 영국 국립공문서관(The National Archives)을 대상으로 한 연구에서 현재의 실내환경 관리 관행이 향후에도 지속될 경우, 지금의 탄소배출 추세가 계속됨을 가정한 최악의 기후변화 시나리오에서 2050년과 2080년에 각각 15%와 24%의 총 에너지 부하가 증가할 것으로 예상한 바 있다(Hong et al., 2012). 실내환경 안정화를 위한 에너지 비용의 상당한 증가는 소장자들이 공조장치 가동을 기피할 가능성을 키우며, 이는 보관시설 내 유산의 손상으로 이어지게 된다.

동산유산은 박물관 외에도 많은 경우 자연공조 정도만 이뤄지는 역사적 건조물 내 부속품으로서 보관되는데, 기후변화로 인해 이러한 건물 내부 온도와 습도의 변화가 유발되는 것으로 나타났다(Querner et al., 2022). 공조장치가 없는 영국 남부의 역사적 건물을 대상으로 18세기 말부터 21세기 말까지의 온·습도를 모델링한 결과 실내 기온은 실외보다 약간 낮은 수준으로 증가하고 연간 상대습도는 거의 변화가 없지만, 계절에 따라 여름은 더 건조해지고 겨울은 더 습해지는 양상이 확인되었다(Lankester et al., 2012a). 우리나라의 경우 유산이 보존되는 실내환경의 미래 온습도를 모델링한 연구는 없으나, 실내기후 변화 추세가 외부 기후의 변화 추세를 따른다는 점을 고려했을 때 향후 외부 기후변화 전망을 검토할 필요가 있다. 국립기상과학원(NIMS, 2022)에 따르면 우리나라 기온은 상승 추세가 뚜렷하며, 21세기 후반 연평균기온이 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 +2.3~6.3°C 상승할 것으로 전망된다. 특히 온실가스 배출이 현재 수준으로 지속될 경우를 가정한 고탄소시나리오에서 연평균기온은 21세기 전반기에는 +1.4°C 상승 수준이나, 21세기 중반부터 급격하게 상승하여 21세기 후반기에 +6.3°C 상승할 것으로 전망되고 있다. 상대습도는 현재 대비 미래에 큰 변화가 없을 것으로 전망되었으나, 시나리오별 전국 분포를 살펴보면 다른 시나리오 대비 온실가스 배출이 현 수준으로 지속되는 고탄소시나리오에서 습도가 전국적으로 현재보다 증가할 것으로 전망되었다(NIMS, 2022). 지역적으로는 강원도 동해안 지역이 모든 시나리오에서 현재보다 상대습도가 뚜렷하게 높아질 것이 나타났다. 그 다음으로 전북-충남-충북 지역이 시나리오에 따른 정도의 차이는 있으나 상대습도가 높아질 경향을 보였다(NIMS, 2022).

## 3.2 실내기후 변화에 따른 지류·식물유산의 손상 전망

### 3.2.1 지류·식물의 특성: 온·습도에 대한 반응을 중심으로

모든 종이와 자연스럽고 불가피한 노화 과정을 거치지만 그 속도는 산성도(pH) 및 물리적 강도와 같은 지류별 특성에 따라 달라지며 실내기후의 영향 또한 많이 받는다(Menart et al., 2011; Verticchio et al., 2021). 다양한 지류 손상 메커니즘 중 지류 열화의 90% 이상을 차지하는 셀룰로오스 가수분해와 산화의 전반적인 화학반응속도에 대해서는 기온의 영향이 크며, 종이의 주재료인 셀룰로오스 분해속도에 대해서는 습도가 연관되어 있다(Lankester, 2013). 즉, 지류 유산은 기본적으로 주변 기후로 인한 열화의 잠재성을 지닌다.

식물은 식물성 섬유인 면, 모시, 삼베, 동물성 섬유인 비단, 가죽으로 구분된다(CHA et al., 2004; Chung, 2010). 식물성 섬유는 주로 미생물에 의해, 동물성 섬유는 주로 해충에 의해 손상된다(CHA et al., 2004). 유기질 유산에 대한 기후변화의 영향을 분석한 연구들 중 식물 유산에 대한 연구사례는 지류 유산보다 더욱 부족하며, 이들은 거의 대다수가 견 소재만을 대상으로 한다(Lankester et al., 2012a; Ashley-Smith, 2013; Bertolin et al., 2014). 일반적으로 견 소재는 특히 빛으로 인한 손상에 가장 취약한 것으로 보고되었으나, Luxford의 연구(2009)를 통해 그간 간과되어온 상대습도 변화가 열화를 증가에 상당히 중요한 요인이 알려지게 되었다.

위에서 기술한 지류·식물 소재 특성으로 인해 21세기 들어서는 여러 유물 보존 방법 중 예방보존 방법으로서 빛, 온도, 습도를 조절하는 공조시스템 등을 동원하여 능동적으로 보존환경을 제어하는 환경제어 방법이 중요시되고 있다(Park, 2004b).

### 3.2.2 화학적 손상 전망

지류·식물 소재 유산이 겪을 수 있는 기후변화 관련 위험으로는 크게 화학적 손상과 생물학적 손상이 있다(Bertolin et al., 2014). 그 중 지류·식물 소재의 화학적 열화 위험을 정량화하는 손상함수의 주요 변수로 기온과 상대습도가 고려되며, 연구자에 따라 활성화에너지(activation energy) 등의 기타변수를 함께 고려하기도 한다(Sesana et al., 2021).

지류·식물을 비롯하여 실내에 위치한 동산유산의 기후변화 영향에 대한 현재까지의 연구는 모두 유럽에서 진행되었는데, 유럽의 많은 동산유산들이 공조장치가 미흡하거나 없는 역사적 건물 내에서 보관 및 전시되는 경우가 많아 이러한 상황을 전제한 연구들이 주를 이룬다. 이를 감안했을 때 유럽 지역에서는 현 시점과 21세기 중반, 21세기 후반 모든 시점에서 실내에 위치한 유물 전반에 대한 손상이 예상된다(Huijbregts et al., 2013; Loli et al., 2018). 지역적으로 북부유럽과 같은 한랭습윤 기후대에서는 화학적 분해로 인한 손상이 약간 증가하고, 유럽 남부 및 서부 해안지역과 같은 온난건조 기후대에서는 화학적 열화 위험이 크게 증가할 것으로 예상된다(Huijbregts et al., 2013; Loli et al., 2018; Coelho et al., 2019).

미래 실내환경이 온·습도에 매우 취약한 지류·식물 재료에 미치는 영향을 추정된 결과, 영국과 유럽 전역의 공조장치가 없는 역사적 건물에서 실내온도는 증가, 연간 평균 상대습도는 크게 변하지 않을 것으로 전망되는 가운데, 지류·견 소재의 화학적 분해와 같이 기온에서 비롯된 손상은 미래에 증가할 것으로 전망되었다(Lankester et al., 2012a; Lankester, 2013). 영국 전역에서 예상되는 기온 상승으로 인해 종이 및 견 분해율이 증가하고(Lankester et al., 2012a; Lankester, 2013), 북유럽과 알프스 지역에서 종이의 수명이 감소할 뿐만 아니라 유럽의 대서양에 면한 해안을 따라 견 손상 위험이 증가할 것으로 예측되었다(Bertolin et al., 2014; Sesana et al., 2021). 향후 기온 상승 전망은 이러한 재료 열화율의 상당한 증가로 이어질 것이며 기후변화의 영향이 더욱 커짐에 따라 다음 세기에는 그 피해가 더욱 커질 수 있다(Lankester et al., 2012a; Lankester, 2013).

특히 지류 유산을 대상으로 기후변화 영향을 고찰한 연구를 살펴보면, 변화하는 기후인자 중에서도 특히 기온 상승이 유럽 대부분의 지역에서 실내 지류유산 손상에 미치는 영향이 분명히 증가할 것으로 나타났다(Lankester et al., 2012b). 지역에 따른 정도의 차이는 있으나 모든 지역에서 2000년대 이후 지류 수명(lifetime for paper)이 줄어드는 추세를 보이고

있으며 21세기 후반으로 갈수록 더욱 가팔라지는 양상을 보였다(Lankester et al., 2012b). 주로 자연공조에 의지하는 역사적 도서관 건물에 보관되는 장서를 대상으로 미기후 관측자료 및 미래 기후 전망을 분석한 연구들에서도 도서관 장서의 종이 열화가 심화될 것으로 분석되었다(Turhan et al., 2019; Verticchio et al., 2021). 이탈리아의 역사적 도서관 3개소를 대상으로 한 연구에서는, 산성지(산성도(pH)=5.2, 중합도(Degree of Polymerisation)=826.3) 고서 보존과 관련하여 전반적인 화학적 위험이 증가할 것으로 전망되었다. 여름에 자연적으로 또는 겨울에 인위적으로 도달한 20°C 이상의 기온과 같이, 산성지 보존에 있어 가장 불리한 조건으로 기후변화의 영향이 커질 것으로 나타났다. 그 결과 도서관의 미기후 조건은 30년 이내에 산성지 소장품의 손실을 유발할 것으로 나타났다(Verticchio et al., 2021). 터키 이즈미르의 역사적 도서관을 대상으로 한 연구에서도 온도가 상승하여 도서관 소장품에 대한 화학적 열화 위험이 증가하고 열 쾌적성 조건이 감소할 것으로 나타났다(Turhan et al., 2019).

직물 소재의 열화에 대한 기후변화 영향을 정량화한 연구는 지류유산에 대한 것보다 더 부족한 실정이지만, 견 분해와 관련한 최근 연구에 따르면 입사광의 자외선 성분이 필터링된 경우 온도와 습도가 견 분해에 있어서 더 중요할 수 있다(Ashley-Smith, 2013). 기후변화로 인해 21세기 후반까지 유럽 전역에서 실내 기온이 지속적으로 증가할 것으로 예상됨에 따라 유럽 전반에서 직물의 화학적 분해를 또한 증가하여 견을 포함한 직물유산의 수명이 감소할 것으로 예상된다(Lankester, 2013). 습도는 종이와 견 모두의 수명을 결정하는 데 중요하지만, 그 중 견 소재에 있어 상대적으로 중요성이 더 크다(Ashley-Smith, 2013). 견 직물은 상대습도가 높아지면 수축하고 상대습도가 낮아지면 팽윤거동을 나타내는데, 이때 섬유와 실이 서로 마찰하는 것은 일반적으로 큰 위험으로 간주된다(Ankersmit et al., 2017). 기온이 상승하더라도 상대습도가 낮으면 견의 손상을 줄이는 데 도움이 되지만, 기후변화에 따른 상대습도의 변화에 비해 기온 상승의 폭이 더 크며, 그로 인한 부정적인 영향 역시 더 지대한 것으로 나타났다(Fig. 1)(Lankester, 2013).

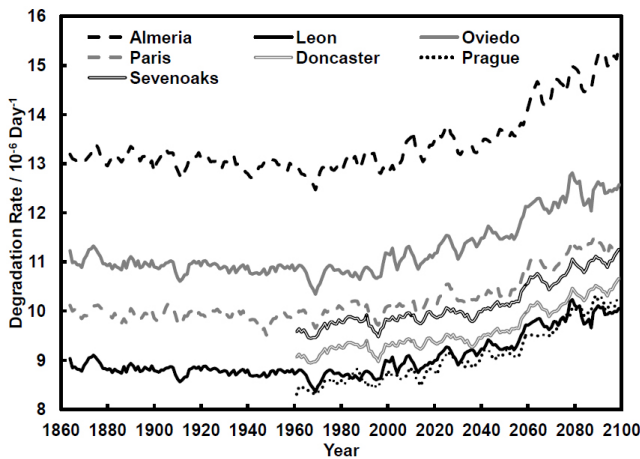


Fig. 1. The projected degradation of silk in seven locations of Europe. The rate is plotted as a smoothed five year average. The baseline period medians of all locations are significantly different to those of the corresponding far future period.

Sources: Lankester, 2013



Fig. 2. Mold damage of paper heritage

Sources: Yonhap News, 2017; Photo courtesy of the Cultural Heritage Administration

### 3.2.2 생물학적 손상 전망

화학적 손상 외에 지류·직물 소재 유산이 겪을 수 있는 기후변화 관련 위험은 생물학적 손상이다. 특히 우리나라에서는 곰팡이나 곤충에 의한 생물학적 손상을 유기질 문화재의 가장 큰 손상원인으로 꼽는다(Fig. 2)(Han, 2006; National Museum of Korea, 2023).

부적절한 기후로 인해 발생하는 곰팡이는 인간의 건강과 유물의 완전성에 광범위하게 영향을 미친다. 곰팡이는 균류에 대한 속어이며, 전 세계적으로 유물에 영향을 미치는 4가지 주요 균류 속(*Cladosporium*, *Alternaria*, *Aspergillus* 및 *Penicillium*)이 있다(Florian, 2002).

곰팡이가 문화유산에 미치는 영향은 가벼운 가루날림에서부터 재료의 심한 얼룩, 약화 및 분해에 이르기까지 다양하다. 곰팡이의 발아 및 성장에 영향을 미치는 환경요인으로는 수분, 무기이온, 질소원, 탄소원, 미량발육인자 등의 화학적 요인, 온도, 습도, 산소, 산성도(pH), 산화환원전위, 광선, 초음파, 압력 등의 물리적 요인, 공생, 길항 등의 생물적 요인이 있다(Kim et al., 1998). 그 중에서도 가장 중요한 요소는 온도, 산성도(pH), 습도, 기질(substrate)의 특성으로 꼽힌다(Kim et al., 1998; Leissner et al., 2015). 곰팡이 포자는 어디에나 있다고 가정하며, 0°C 이상의 온도와 70% 이상의 상대습도 수준에서 곰팡이 포자가 발아할 수 있다고 본다. 온도와 습도가 높아지면 발아까지 걸리는 시간이 줄어든다. 생물학적 활동은 온도에 따라 달라지며 성장을 위해서는 특정 최소 습도가 필요하다(Leissner et al., 2015). 또한 이들은 산성 부근에서 최적 산성도(pH)를 갖는다(Kim et al., 1998).

곤충은 문화재를 손상시키는 또 다른 원인으로, 특정 나방과 딱정벌레, 좀벌레 등 같은 곤충에 의해 피해가 발생해왔다. 곤충의 활동은 5~30°C의 온도에서 존재하지만 15°C 미만에서는 피해가 제한적이다(Loli et al., 2018). 기온, 습도와 같은 단일 기후요소의 변화뿐 아니라, 계절성의 변화처럼 여러 기후요소들이 복합적으로 작용하여 나타나는 변화들에 따른 해충 피해도 발생할 수 있다. 가령 북반구의 짧아진 겨울은 해충의 생존율을 높인다. 지역 기후의 변화는 필연적으로 종 분포의 변화를 가져오고, 이는 해충과 연관된 여러 피해를 새로운 지역에 확산시킬 수 있다(ICOMOS CCCHWG, 2019)

기후변화에 따른 향후 지류·식물유산의 생물학적 손상에 대한 연구결과를 살펴보면 유럽 전역에서 해충활동과 같이 기온에서 비롯된 손상이 미래에 증가할 것으로 나타났다. 곰팡이의 성장 역시 전반적으로 증가하는 가운데, 그 정도는 지역과 계절에 따른 차이가 존재할 것으로 보인다. 특히 시기/계절적으로 습도가 증가할 때 곰팡이 성장 위험이 크게 나타났다(Lankester et al., 2012a). 21세기 후반에 들어서면 온·습도 변화로 인해 북유럽 지역에서조차 생물학적 손상이 크게 증가할 것으로 예상되었다(Loli et al., 2018).

유물이 보존되는 실내환경에서 곰팡이 성장을 대상으로 기후변화 영향을 고찰한 연구를 살펴보면, 21세기 동안 기온과 상대습도의 증가 추세에 따라 곰팡이의 발아 및 성장속도가 증가할 것이며, 그 속도는 21세기 후반으로 갈수록 더 빨라질 것으로 전망된다(Lankester, 2013; Querner et al., 2022). 특히 상대습도의 증가는 향후 곰팡이의 발아 및 성장을 더욱 강화할 것으로 보인다. 유럽의 경우 연간 평균 상대습도가 감소할 것으로 전망됨에도 불구하고 곰팡이 위험이 모든 곳에서 상당히 증가할 것으로 예상되었다. 1년 중 여름철은 기온이 상승하여 상대습도가 낮아지지만, 따뜻해진 겨울철 상대습도가 큰 폭으로 증가할 것으로 나타나(Lankester, 2013; Querner et al., 2022), 북부 및 서부유럽의 한랭습윤기후 지역에서 곰팡이 성장 위험도가 온난건조한 남부유럽보다 오히려 높을 것으로 전망되었다(Huijbregts et al., 2013).

기후변화로 인해 실내 해충의 개체군 증가 역시 이미 관찰되고 있다. 그 예로 나비목 애웃좀나방(*Tineola bisselliella* (Hummel, 1823)), 딱정벌레목 애알락수시령이(*Anthrenus verbasci*(Linnaeus, 1767)), 딱정벌레목 인삼벌레(*Stegobium paniceum* Linnaeus, 1758)를 들 수 있으며, 최근에는 딱정벌레목 수시령이과 *Attagenus smirnovi* 및 *Trogoderma angustum* Solier, 1849가 단시간 내에 돌이킬 수 없는 피해를 입혀 박물관과 소장품에 실질적 위협요인으로 부상하였다(Querner et al., 2022). 이러한 해충 증가 추세의 주된 원인으로서 곤충의 활동과 번식주기를 증가시키는 기온 상승이 지목되고 있다(Lankester et al., 2012a). Querner et al.(2022)는 관련 연구들로부터 수 °C 범위의 기온 상승이 다음과 같은 5가지 효과를 가져올 것으로 정리한 바 있다.

- (i) 낮 기온이 15 °C 이상인 기간 동안 활동 증가
- (ii) 산란수 증가



- (iii) 연간 생식주기 횟수 증가
- (iv) 비행기간 연장, 이동성 증가
- (v) 새로운 종의 침입

미래 기후변화 추세에 따른 박물관 해충 활동의 전망을 연구한 바에 따르면, 외부의 기온 상승이 실내 기온도 상승시킴에 따라 해충에 의한 피해 위험이 증가할 것으로 나타난다. 가령 영국 전역에서 예상되는 실내 기온 상승으로 인해 도일(degree days) 수가 증가하여 지역에 따른 시기와 폭은 다르지만 해충에 의한 피해 위험이 모든 곳에서 증가할 것으로 예상되었다(Lankester et al., 2012a). 도일은 대부분의 곤충 종의 최적 성장에 필요한 온도의 하한 임계값 15°C 이상의 온도를 보이는 일수로, 유물 손상과 직접적으로 연결되지는 않지만 지표로 사용할 수 있다. 북유럽에서는 딱정벌레목 수시령이과 *Attagenus smirnovi*의 성장 및 확산에 유리한 기후조건을 가진 지역이 향후 100년 동안 북유럽 전반에서 점차 늘어나고, 스칸디나비아 남부, 남동부에서 여름과 늦여름 비행을 통해 *Attagenus smirnovi*의 확산 가능성이 높아질 것으로 전망하였다(Hansen et al., 2012).

#### 4. 논의 및 제언

박물관이나 미술관 등에서는 전통적으로 손상 방지를 위해 다양한 화학약제를 사용해왔다. 현재 우리나라는 Hygen-A®(HFC-134a(CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>) 85% 및 Ethylene Oxide(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) 15% 혼합가스)를 사용하여 훈증소독 처리를 하고 있다. 하지만 화학약제의 대량 사용에도 불구하고 외부로부터 유해생물이 지속적으로 유입되고 박물관 직원이나 관람객의 건강에 관한 인식이 높아지면서 미연에 생물피해를 줄이기 위한 예방법으로서 종합적 유해생물관리(Integrated Pest Management, 이하 IPM) 체제를 도입한 박물관이 늘어나고 있다(Oh, 2008). 이는 유물의 입고에서부터 전시, 보관까지 모든 단계에서 총·균해 방지를 위해 복합적인 대책을 수립하는 통합적 방역관리 체계이다(Kim, 2008). 국내에서는 2007년 이래 국립민속박물관, 국립중앙박물관, 대한민국의사박물관, 서울역사박물관 등이 최적화된 방제대책 마련을 위해 IPM을 적용한 사례가 있다(Lee et al., 2007; National Folk Museum of Korea, 2008; National Museum of Korean Contemporary History, 2023; Seoul Museum of History, 2023). 최근 국립태안해양유물전시관도 방제대책 수립을 위해 IPM을 적용한 바 있다(Kim et al., 2021). 하지만 2017년을 기준으로 공립박물관 40개소 중 27%인 11개소만이 수장고를 대상으로 IPM을 운영하는 것으로 나타나 박물관 및 수장고 운영에 있어 IPM에 대한 인식은 충분하지 않은 상황이다(Ministry of Culture, Sports and Tourism, 2017). 한편, 국내 전시·수장시설은 대기오염의 방지와 재난을 대비하고 외광을 차단하기 위한 목적으로 폐쇄적인 건물이 대부분이다(Kim, 2008). 또한 외부로부터 빛을 별로 받지 않는 방식을 채택하고 있으며, 전시품의 재질적 취약성에 따라 진열장 내의 전시가 대부분이고 특수 형광등을 주 광원으로 하는 경우가 많다(Kim, 2008).

문제는 기후변화로 인한 기온 상승 및 습도의 변화는 지류·식물을 포함한 유기질 동산유산 전반의 화학적, 생물학적 손상의 속도와 범위를 증가시킬 것으로 전망된다는 점이다. 특히 우리나라의 유물 보존에서 가장 염두에 두고 있는 생물학적 손상과 관련하여 유럽에서 이루어진 여러 연구들이 하나같이 향후 가해생물들의 지리적 범위 확산, 개체군 및 세대수 증가, 침입종 위험 증가를 예상하고 있다는 점은 우리나라에도 시사하는 바가 크다.

능동적인 기후제어 기능을 갖춘 박물관 건물은 이러한 기후변화의 위협으로부터 그나마 안전하다고 여겨질 수 있다. 그러나 이러한 제어시스템은 이미 개인소장자들이 시설 가동을 기피케 하는 요인인 높은 에너지수요를 가지고 있고, 변화하는 기후로 인해 더 많은 에너지를 필요로 하여 실내기후 조절 비용 증가를 피할 수 없을 것이다(van Schijndel et al., 2018).

실시간 온습도 모니터링이 이루어진 바 있는 국내 박물관 사례에서도 박물관측에서 공조장치를 24시간 상시가동이 아닌, 비정기적 디지털온습도계 확인을 통해 하루 중 일정시간 가동하는 방식으로 운영하고 있었다(Im et al., 2021). 더욱이 기후조절 장치가 없거나 미흡한 개인 수장고나 역사적 건축물은 외부의 변화된 공기가 단열이 잘 안 되는 건물을 통과하여 실내 온·습도에 직접적인 영향을 가할 것으로 예상된다. 게다가 점차 극심화되어 빈발하고 있는 이상기후 현상이 기존의 재난위험관리 관행을 넘어서는 복잡성을 지니며, 방재시설을 갖춘 현대적인 보관시설조차 손상 또는 파괴시키고 있다. 또한 우리나라는 계절에 따라 상이한 기후조건을 갖는 특성상 이미 계절간 급변하는 온·습도 변화로 인한 외부 해충의 유입 및 발생 위험이 큰데(National Folk Museum, 2008), 기후변화에 따른 점진적인 온·습도 변화, 이상기후로 인한 급격한 온·습도 변화, 그에 따른 가해생물 유입으로 인한 손상 위험이 향후 더욱 커질 것으로 판단된다. 따라서 기후변화가 동산 유산에 미치는 영향에 대한 보다 적극적인 관심과 노력이 필요하다. 항온·항습 유지, IPM/유해생물 방제, 모니터링, 유물 포장방법 개선 등 유물 보관시설에 대해 기존에 요구하는 예방보존 작업을 보다 자주, 보다 철저히 강화하고, 공정별로 기존에 사용되던 방법을 개선하려는 노력이 필요하다.

특히 예방보존을 위한 보존환경제어와 관련하여 우리나라 박물관의 전시장 및 수장고에 대한 보존환경 조사가 자주 이루어져야 함이 이미 지적된 바 있지만, 보다 빈도 높은 주기적이고 세밀한 조사와 모니터링 체계 구축 및 지속적인 관리가 요구되는 시점이다. 이와 관련하여 앞서 기후변화가 동산유산에 미치는 위험을 정량화한 연구들은 그 영향 분석을 위한 근간이자 중심이 되는 작업으로서 실내기후와 곰팡이·해충 모니터링을 우선적으로 강조하고 있다(Querner et al., 2022). 공조설비의 유무를 비롯하여 다양한 유형에 따른 건물의 실내기후 모니터링과 함께, 곰팡이·해충 종에 대한 실험실 연구 또한 뒷받침함으로써 보다 타당성있는 미래 영향 시뮬레이션 결과를 도출할 수 있다(Querner et al., 2022). 이러한 결과를 토대로 하여 환경변화에 매우 취약한 유기물 동산유산의 예방보존을 위하여 더욱 철저한 환경제어를 적용할 수 있을 것이다.

지류·식물 유산으로부터 효과적이고 친환경적으로 곰팡이와 해충을 제거하는 방법에 대한 고민 또한 필요하다. 곰팡이 등 부착된 미생물 농도가 높은 경우에는 기존 훈증소독 처리를 수차례 시행하여도 안쪽 깊숙한 곳에 미생물이 활성화 상태로 여전히 남아있기도 하고, 시간이 지난 후 재발생하여 완전 박멸하기 어려운 점이 있다. 향후 기후변화로 인해 그에 따른 미생물과 해충 발생이 더욱 심화될 전망을 고려했을 때 유물의 소독처리가 더 자주 이루어지고 강화될 수밖에 없을 것이며, 따라서 훈증처리 기법이 아닌 대체 기술의 개발 및 적용이 시급하다. 이와 관련하여 국립문화재연구소가 2021년부터 5개년 계획으로 ‘동산문화재 재해·재난 대응 응급 보존처리를 위한 방사선 활용 훈증 대체기술’ 연구를 시작하여 방사선 조사처리 공정을 개발 중에 있다는 점은 고무적이라 할 수 있다. 주 내용으로 방사선 이용 멸충·멸균 제어를 통한 대용량 소독처리 공정 개발, 재난 대비 방사선 활용 유산 보존 소독 긴급조치 표준매뉴얼 개발 등을 계획하고 있다. 이를 통해 이전보다 짧은 시간 내 유산의 내부조직까지 효과적으로 소독할 수 있는 높은 효율성과 친환경성, 비용 절감효과뿐 아니라 유산의 상시관리 및 대량, 신속 보존처리가 보다 수월해질 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

동산유산은 많은 경우 박물관과 같은 실내에서 보존되는 경우가 많아 옥외 기후변화 영향에 대한 직접적인 노출이 적어 국내외 문화유산과 기후변화 현안에서 다른 유산들에 비해 상대적으로 간과되는 면이 있었다. 그러나 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 향후 50~100년 동안 더 따뜻한 기후, 습도 변화, 극한 기후 현상의 증가가 나타날 것이라고 전망하면서 기후변화가 문화유산에 미치는 영향에 대한 시급성을 표하고 있다(IPCC, 2022). 기후변화가 실내기후에 미치는 영향은 분명 외부 기후에 대한 영향보다 작으나, 이 작은 변화가 임계점에서 발생하는 경우 아주 작고 완만한 변화라도 그 영향을 증폭시킬 수 있다는 데 맹점이 있다(Lankester et al., 2012a). 게다가

가 오늘날의 기후변화는 끝이 없다는 점, 다양하고 복합적인 양상으로 진화하고 있다는 점으로 인해 더 이상 동산유산에 대한 영향을 간과할 수 없는 시점에 이르렀다. 이에 본 연구는 특히 외부환경에 취약한 지류·직물유산을 중심으로 향후 우리 문화유산의 보존에 영향을 미칠 기후변화의 다양한 측면과 전망에 대한 연구동향을 고찰하고자 하고, 우리나라 유산의 보존을 위한 제언을 도출하고자 하였다.

끝으로 유기질 유산에 대한 기후변화의 영향을 고려하는 데 있어 염두에 두어야 할 두 가지 사항을 정리할 수 있다. 첫째, 유산 자체 특성과 관련한 측면으로, 둘 이상의 상이한 특성을 지닌 소재로 이루어진 유산의 경우 변화하는 기후에 대한 소재별 상이한 반응과 불일치에 따른 추가적 손상이 발생할 가능성이 있다. 일례로 패널페인팅(panel painting)을 대상으로 하여 회화가 담긴 석고 부분과 이를 둘러싼 목재들에 대한 기후변화의 영향을 개별적으로 분석한 연구사례를 들 수 있다 (Huijbregts et al., 2013). 이에 따르면 목재 부분은 상대습도의 오랜 시간에 걸친 느린 변화에 반응했고, 석고 부분은 상대 습도의 변동이 석고패널의 반응시간보다 더 오래 지속될 경우 손상이 발생할 것으로 나타났다. 또한 상대습도 변동에 대한 석고층의 반응이 매우 빠름에 따라 석고와 목재를 간의 반응속도 불일치가 회화가 담긴 석고부위의 균열로 이어질 수 있음이 시사되었다. 둘째, 보존 조치와 관련된 측면으로, 현 시점 기준 어느 한 곳에서 유효한 보존 조치 및 관리전략은 미래의 다른 곳에서도 적용될 수 있지만, 위치에 따라 나타나는 차이, 가령 가해생물종 등이 다를 수 있으므로 그렇게 간단하지 않을 수 있다(Lankester, 2013). 또한 곰팡이·해충 관리 전략들이 서로 유사하더라도 미래의 새로운 환경을 감안할 때 늘 그대로 이전 및 적용시킬 수 있는 것은 아님을 염두에 두어야 한다.

## 감사의 글

본 논문은 2023년도 문화재청 국립문화재연구원에서 수행하는 문화재 조사연구(R&D) 과제인 문화재 재해영향 분석 및 피해저감 연구(NRICH-2305-A65F-1)의 지원을 받아 작성된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

## References

- Ahn, S.J. (2022). Students volunteering to restore books damaged by leaking water. Seoul National University Press, September 25<sup>th</sup> 2022. <http://www.snunews.com/news/articleView.html?idxno=31076>
- Ankersmit, B., Stappers, M. (2017). *Managing Indoor Climate Risks in Museums*. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany.
- Ashley-Smith, J. (2013). *Climate for Culture. Report on Damage Functions in Relation to Climate Change*. European Union's Seventh Programme for Research, Technological Development and Demonstration under Grant Agreement No.226973.
- Bertolin, C., Camuffo, D. (2014). *Climate Change Impact on Movable and Immovable Cultural Heritage throughout Europe. Damage Risk Assessment, Economic Impact and Mitigation Strategies for Sustainable Preservation of Cultural Heritage in the Times of Climate Change*. Climate for Culture—Deliverable 5.2.
- Bunyan, R. (2023). 'It's the end of the world': Shell-shocked Italy struggles to come to terms with 'apocalyptic' tourist region floods that have devastated towns, killed at least eight and forced Italian F1 Grand Prix to be cancelled. Daily Mail, May 17th 2023. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-12093127/Flood-nightmare-hits-Italian-towns-four-dead-thousands-evacuated.html>
- Camuffo, D., Grieken, R., Busse, H., Sturaro, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., Gysels, K., Deutsch, Fl, Wieser, Mo., Kim, O., Ulrych, U. (2001). "Environmental monitoring in four European museums." *Atmospheric Environment*, Vol.35, No.1, pp.S217-S140.

- CHA (Cultural Heritage Administration) (2023). Comprehensive Plan for Climate Change Response for National Heritage. CHA, Daejeon, Korea.
- CHA (Cultural Heritage Administration), NRIC (National Research Institute of Cultural Heritage) (2004). Conservation and Management for Movable Cultural Heritage. NRIC, Daejeon, Korea.
- Chung, Y.J. (2010). Conservation management of organic cultural heritage. In: Cultural Heritage Administration (2010). Basic Understanding of Conservation Science. Education Center for Traditional Culture at Cultural Heritage Administration, Buyeo, Korea.
- Coelho, G.B.A., Silva, H.E., Henriques, F.M.A. (2019). "Impact of climate change on cultural heritage: A simulation study to assess the risks for conservation and thermal comfort." *International Journal of Global Warming*, Vol.19, No.4, pp.382-406.
- Florian, M.-L.E. (2002). *Fungal Facts*. Archetype Publications, London, UK.
- Han, S.H. (2005). Conservation management of organic cultural assets. In: National Research Institute of Cultural Heritage (Eds.) (2005). *Basic Training in Conservation Science*. National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, Korea, pp.39-57.
- Hansen, L.S., Åkerlund, M., Grøntoft, T., Ryhl-Svendsen, M., Schmidt, A.L., Bergh, J.E., Jensen, K.M.V. (2012). "Future pest status of an insect pest in museums, *Attagenus smirnovi*: Distribution and food consumption in relation to climate change." *Journal of Cultural Heritage*, Vol.13, No.1, pp.22-27.
- Hong, S.H., Strlič, M., Ridley, I., Ntanos, K., Bell, N., Cassar, M. (2012). "Climate change mitigation strategies for mechanically controlled repositories: The case of The National Archives, Kew." *Atmospheric Environment*, Vol.49, pp.163-170.
- Hughes, R.A. (2023). Northern Italy floods leave museums submerged and ancient frescoes damaged, *Euronews.culture*, May 25th 2023. <http://www.euronews.com/culture/2023/05/25/northern-italy-floods-leave-museums-submerged-and-ancient-frescoes-damaged>
- Huijbregts, Z., Martens, M.H.J., van Schijndel, A.W.M., Schellen, H.L. (2013). Computer modelling to evaluate the risks of damage to objects exposed to varying indoor climate conditions in the past, present, and future. In: Mahdavi, A., Mertens, B. (Eds.). *2nd Central European Conference on Building Physics*. Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) CCCHWG (Climate Change and Cultural Heritage Working Group) (2019). *The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action*. ICOMOS, Paris, France.
- Im I.G., Lim S.D., Han G.S. (2021). "Real-time monitoring of temperature and relative humidity and visualization of pest survey data for integrated pest management in collection storage area." *Journal of Conservation Science*, Vol.37, No.5, pp.440-450.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2022). *Climate Change 2022: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jeong S.H., Park S.K. (2016). "Research of monitoring of conservation condition and investigation method of national designated heritage: focusing on regular monitoring of national designated movable cultural heritage." *Mun Hwa Jae*, Vol.49, No.4, pp.196-217.
- Jo S.S., Kim J.S. (2023). "A study on the cultural heritage policy to cope with climate change." *Journal of the Society of Cultural Heritage Disaster Prevention*, Vol.8, No.1, pp.29-39.
- Kim J.H. (2023). "Recovery of books damaged by leaking water in Seoul National University Library and organization of student volunteer group." *Bulletin of the Seoul National University Library*, Vol.145, pp.5-20.
- Kim J.O., Park M.S., Park J.S., Lee S.H., Hyun C.S. (1998). *Environmental Microbiology*. Hyungseul Publishing, Seoul, Korea.
- Kim J.Y., Kim Y.J. (2001). "Overseas trends in climate change responses for cultural heritage and implications."

- Journal of the Society of Cultural Heritage Disaster Prevention, Vol.6, No.1, pp.47-56.
- Kim, T.J., Cho, H.K., Kim, Y.S. (2021). "An Investigation into Integrated Pest Management (IPM) of the National Tae'an Maritime Museum." *Maritime Cultural Heritage*, Vol.15, pp.169-191.
- Kim, Y.J. (2008). Museum and IPM. In: National Folk Museum of Korea (Eds.) (2008). *Museum and Pest Management*. National Folk Museum of Korea, Seoul, Korea, pp.10-39.
- Lankester, P. (2013). *The Impact of Climate Change on Historic Interiors*, Ph.D. Dissertation, University of East Anglia, UK.
- Lankester, P., Brimblecombe, P. (2012a). "The impact of future climate on historic interiors." *Science of the Total Environment*, Vol.417-418, pp.248-254.
- Lankester, P., Brimblecombe, P. (2012b). "Future thermohygro-metric climate within historic houses." *Journal of Cultural Heritage*, Vol.13, No.1, pp.1-6.
- Lee, S.E., Roh, H.S. (2007). "IPM (Integrated Pest Management) Method at National Museum of Korea." *Conservation Science in Museum*, Vol.8, pp.25~30.
- Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L., Jacob, D., Mikolajewicz, U., Broström, T., Ashley-Smith, J., Schellen, H.L., Martens, M., van Schijndel, J., Antretter, F., Winkler, M., Bertolin, C., Camuffo, C., Simeunovic, C., Vyhliđal, T. (2015). "Climate for culture: Assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations." *Heritage Science*, Vol.3, No.38.
- Loli, A., Bertolin, C. (2018). "Indoor multi-risk scenarios of climate change effects on building materials in Scandinavian countries." *Geosciences*, Vol.8, No.9, 347.
- Luxford, N. (2009). *Reducing the Risk of Open Display: Optimising the Preventive Conservation of Historic Silks*. Ph.D. Dissertation, University of Southampton, UK.
- Menart, E., de Bruin, G., Strlič, M. (2011). "Dose-response functions for historic paper." *Polymer Degradation and Stability*, Vol.96, No.12, pp.2029-2039.
- Ministry of Culture, Sports and Tourism (2017). *A Study on the Guidelines for the Installation and Safety Management of Public Museum Storage*.
- National Folk Museum of Korea (2008). *Museum and Pest Management*. National Folk Museum of Korea, Seoul, Korea.
- National Museum of Korea (2023). *Museum environment*, [http://www.museum.go.kr/site/main/content/environmental\\_research](http://www.museum.go.kr/site/main/content/environmental_research)
- National Museum of Korean Contemporary History (2023). <https://www.much.go.kr/museum/cnts/conservedo#>
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences). (2022). *South Korea's Detailed Climate Change Outlook Report: Climate Change Outlook based on Four SSP Scenarios*. NIMS, Seogui-po, Korea.
- NRICH (National Research Institute of Cultural Heritage) (2022). *Climate Change Responses for Cultural and Natural Heritage of Korea: Status Quo and Challenges*. NRICH, Daejeon, Korea.
- Oh, J.S. (2008). Pest control for cultural heritage. In: National Folk Museum of Korea (Eds.) (2008). *Museum and Pest Management*. National Folk Museum of Korea, Seoul, Korea, pp.11-65.
- Park, J.S. (2004a). "Conservation for historical paper and textile in Korea." *Academic Symposium of the Korean Traditional Costume Research Institute*, Pusan, Korea, pp.30-33.
- Park, J.S. (2004b). Conservation and management of textile cultural assets. In: NRICH (National Research Institute of Cultural Heritage) (Eds.). (2004). *Basic Training in Conservation Science*, NRICH, Daejeon, Korea.
- Querner, P., Sterflinger, K., Derksen, K., Leissner, J., Landsberger, B., Hammer, A., Brimblecombe, P. (2022). "Climate change and its effects on indoor pests (insect and fungi) in museums." *Climate*, Vol.10, No.7, 103.
- Redazione ANSA (2023). *L'alluvione in Emilia Romagna innesca da mesi di siccità*, ANSA.it, May 4th 2023. [http://web.archive.org/web/20230517230603/http://www.ansa.it/canale\\_scienza\\_tecnica/notizie/terra\\_poli/2023/05/04/lalluvione-in-emilia-romagna-innescata-da-mesi-di-siccita-\\_1208a01c-7242-4d12-a6d2-ac3f36a1ddc2](http://web.archive.org/web/20230517230603/http://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/notizie/terra_poli/2023/05/04/lalluvione-in-emilia-romagna-innescata-da-mesi-di-siccita-_1208a01c-7242-4d12-a6d2-ac3f36a1ddc2).

html

- Saunders, D. (2008). "Climate change and museum collections." *Studies in Conservation*, Vol.53, No.4, pp.287-297.
- Seoul Museum of History (2023). Cultural Assets. Conservation Science. <https://museum.seoul.go.kr/www/relic/cons/dataConssumculture/dataConssumMgr.jsp?sso=ok>
- Sesana, E., Gagnon, A.S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. (2021). "Climate change impacts on cultural heritage: A literature review." *Climate Change*, Vol.12, No.4, e710.
- Turhan, C., Arsan, Z.D., Akkurt, G.G. (2019). "Impact of climate change on indoor environment of historic libraries in Mediterranean climate zone." *International Journal of Global Warming*, Vol.18, No.3-4, pp.206-220.
- UNESCO WHC (World Heritage Centre) (2021). State of Conservation, <http://whc.unesco.org/en/factors/>
- UNESCO WHC (World Heritage Centre) (2007). *Climate Change and World Heritage: Report on Predicting and Managing the Impacts of Climate Change on World Heritage and Strategy to Assist States Parties to Implement Appropriate Management Responses*. World Heritage Reports 22, UNESCO WHC, Paris, France.
- van Schijndel, A., Schellen, H. (2018). "Mapping future energy demands for European museums." *Journal of Cultural Heritage*, Vol.31, pp.189-201.
- Verticchio, E., Frasca, F., Bertolin, C., Siani, A.M. (2021). "Climate-induced risk for the preservation of paper collections: Comparative study among three historic libraries in Italy." *Building and Environment*, Vol.206, 108394.
- Yonhap News (2017). Mold and browning... 6 out of 10 national treasures and treasure-level calligraphy and paintings require urgent conservation treatment, Yonhap News, January 15th 2017, <http://www.yna.co.kr/view/AKR20170114028500005>