

[총설]

# 국내 석조유산의 기후변화 영향: 연구동향과 미래전망

김지영<sup>1</sup>

공주대학교 문화재보존과학과

[Review]

## Climate Change Impact on Korean Stone Heritage: Research Trends and Prospect

Jiyoung Kim<sup>1</sup>

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 32588, Korea

<sup>1</sup>Corresponding Author: [culcon15@gmail.com](mailto:culcon15@gmail.com), +82-10-8823-1516

**초록** 전지구적으로 일어나는 기후변화에 대응하기 위해 20세기 말부터 선진국을 중심으로 기후변화에 의한 문화유산 취약성 평가와 대책 연구가 활발히 이루어져 관련 연구방법이 정립되고 방대한 기후자료와 손상예측 자료가 축적되었다. 우리나라는 관련된 정책연구가 다수 수행된 반면 여전히 과학적인 근거자료를 확보해야 하는 당면 과제가 남아있다. 한반도 미래 기후자료를 반영한 국내 석조유산의 미래 손상양상은 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화 측면에서 복합적으로 변화할 가능성이 높으며, 이는 문화유산 보존 분야의 산업과 행정관리에도 영향을 미칠 것으로 전망된다. 앞으로 기후변화에 의한 석조유산의 영향 연구는 지역과 자료주기의 다운스케일을 통해 정밀화된 방향으로 진행되어야 한다. 이를 통해 손상유형과 지역별로 미래 환경에 취약한 석조유산을 가려내고 대응방안을 마련하는 것이 필요하다.

**중심어:** 기후변화, 석조유산, 물리적 풍화, 화학적 풍화, 생물학적 풍화

**ABSTRACT** Studies on vulnerability of cultural heritage and adaptation strategy to worldwide climate change have been actively carried out in advanced countries since the late 20th century, and this established a valid research methodology and piled up climate and deterioration dataset in the field of climate change. Meanwhile, we still have tasks to acquire related scientific data despite referencing political researches in Korea. Applying Korean future climate to impact analysis, deterioration of Korean stone heritage is likely prospected to change into complexity in terms of physical, chemical and biological weathering that may bring impacts on conservation business and administrative field of cultural heritage. Further studies will ensure detailed implication of climate change impact on Korean stone heritage by means of down-scaling analysis of areas to local scale and dataset frequency to an hour. It is important to sort out capability and vulnerability of the stone heritage to future environment, and to make an adaption and prevention strategies.

**Key Words:** Climate change, Stone heritage, Physical weathering, Chemical weathering, Biological weathering

## 1. 서론

최근 각종 매체를 통해 ‘기후변화’라는 말을 어렵지 않게 들 수 있다. 지난 50년간 산업화와 인간활동의 결과로 발생한 온실가스는 산업화 이전의 2만년 보다 훨씬 빠른 속도로 지구온난화를 일으키고 있고 앞으로도 최소 100~200년간 그 영향이 지속될 것이라 전망되고 있다(Solomon *et al.*, 2007; Korea Environmental Institute, 2010). 기후변화는 직접적으로 생태계 파괴, 물과 식량의 감소, 질병, 자연재해, 에너지 부족 등을 일으킬 뿐만 아니라 파급효과로 관광, 교통, 이주, 분쟁 등 사회의 전 분야에 영향을 미쳐 사회경제적 막대한 손실을 야기할 것으로 예측되고 있다(Ministry of Strategy and Finance *et al.*, 2015; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2016).

문화유산 분야도 예외가 아니다. 국제연합교육과학문화기구(UNESCO)에 따르면 세계유산인 페루의 찬찬 유적(9~15세기)은 빈번해진 엘니뇨현상으로 1997년부터 1998년 사이에 평년의 30배(3,000 mm)에 달하는 폭우가 내려 토제 성벽이 붕괴되고 지하수위의 급격한 상승으로 염성분이 유입되면서 유적 전체에 심각한 염풍화를 일으켰다(UNESCO, 2007)(Figure 1A). 뿐만 아니라 이탈리아 베니스 역사지구는 20세기 이후 지하수면 상승이 가속화되어 도시 유적지의 침수면적이 점차 확대되고 있다(UNESCO, 2007)(Figure 1B). 사막화로 인한 모래 피해로 ‘위험에 처한 세계유산(1990년~2005년)’에 지정되었던 말리 팀북투 유적은 이후에도 인위적인 훼손과 홍수 피해로 2012년 다시 ‘위험에 처한 세계유산’으로 등재되었다(World Heritage Center, 2016). 이 지역은 1901년~1996년 동안 평균기온

이 1.4°C 상승하였고 가뭄의 영향이 점차 현저해지고 있으며 집중호우가 발생하는 등 기후변화와 연관된 중요한 징후들이 관찰되었고 이는 앞으로도 유적의 사막화와 모래피해를 증가시킬 것이라고 한다(UNESCO, 2007)(Figure 1C).

미래에 평균기온의 상승과 강수량 증가 및 극한기후의 발생빈도 증가는 석조유산에 갑작스런 재해뿐만 아니라 점진적인 훼손과 풍화를 일으킬 것이다(Sabbioni *et al.*, 2012). 오늘날 우리나라 국가지정 석조유산은 조성된 이래 오랜 세월이 지나 80% 이상이 중간풍화(Moderately weathered) 이상의 풍화도를 보이고 있고(Jun *et al.*, 2006), 기후변화가 일어날 경우 먼 미래에 석조유산의 풍화양상은 변화할 가능성이 크다(Viles, 2002).

유럽에서는 기후변화 대응연구에 문화유산 보호 부문을 중점연구분야로 채택하여 장기적이고 효율적인 대책을 마련해 왔다. 유럽위원회(European Commission)는 6차 및 7차 연구프로그램(Sixth and Seventh Frameworks)을 통해 문화유산의 기후변화 영향 연구프로젝트를 대대적으로 지원하여 관련된 과학적 근거자료를 축적하고 대응방안을 마련하였다(Fraunhofer, 2014). 우리나라는 2008년에 한반도 기후변화대응 국가연구개발 중장기 종합기본계획에서 기후변화 영향평가 및 적응연구 부문에 문화재기술을 채택하여 연구의 중요성과 필요성을 인식하였으나 이후 정책 차원의 연구지원으로 이어지지 못한 채 여전히 많은 연구가 필요한 실정이다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2012).

이 연구에서는 기후변화가 석조유산에 미치는 영향에 대해 국내외 선행연구를 분석하여 동향을 파악하고, 한반도 기후변화가 옥외 석조유산의 손상에 미칠 주요 영향을



**Figure 1.** Heritage disaster by climate change. (A) Water and salt disaster in Chan Chan archaeological zone, Peru, (B) Submerging Venice and its Lagoon, Italy, (C) Sand encroachment and wind erosion of earthen walls of Timbuktu, Mali.

**Table 1.** Study areas for climate analysis in South Korea(in alphabetical order).

No.	City	No.	City	No.	City	No.	City	No.	City
1	Andong	12	Chungju	23	Gwangju	34	Jeongup	45	Suwon
2	Boeun	13	Chupungnyeong	24	Haenam	35	Jinju	46	Uiseong
3	Bonghwa	14	Daegu	25	Hapcheon	36	Miryang	47	Uljin
4	Boryeong	15	Daejeon	26	Hongcheon	37	Mokpo	48	Ulsan
5	Busan	16	Dongducheon	27	Icheon	38	Mungyeong	49	Wonju
6	Buyeo	17	Donghae	28	Imsil	39	Namwon	50	Yangpyeon
7	Changwon	18	Ganghwa	29	Incheon	40	Pohang	51	Yeongcheon
8	Cheolwon	19	Gangneung	30	Inje	41	Sancheong	52	Yeongdeok
9	Cheonan	20	Geochang	31	Jangheung	42	Seosan	53	Yeongju
10	Cheongju	21	Gumi	32	Jecheon	43	Seoul	54	Yeongwol
11	Chuncheon	22	Gunsan	33	Jeju	44	Sokcho	55	Yeosu

전망하였다. 연구결과는 기후변화로 인한 석조유산의 피해를 완화하기 위한 선제적 대응방안을 마련하고 향후 연구의 방향 제시 및 관련 정책을 제안하기 위한 근거자료로 활용될 것이다.

## 2. 연구방법

연구를 위해 국내외에 보고된 석조유산의 기후변화 영향 사례와 연구문헌을 분석하여 동향을 파악하고 미래의 변화된 기후가 일반적으로 석조유산에 가져오게 될 손상 변화의 가능성을 물리, 화학 및 생물학적 풍화 관점에서 정리하였다. 또한 한반도 지역의 기후변화에 수반되는 국내 석조유산의 보존과 훼손에 대한 영향을 광역적으로 파악하기 위해 국내 기상청에서 기후변화 시나리오에 의해 산출한 기후자료를 분석하여 개별 기후요소 변화가 우리나라 석조유산의 물리적, 화학적 및 생물학적 풍화에 미치는 영향을 이론적으로 예측하였다. 기후에 의한 석조유산의 풍화 예측은 현재까지 국내에서 개발되거나 연구된 사례가 없기 때문에 유럽위원회에서 6차 및 7차 연구프로그램을 통해 개발한 연구방법을 본 연구에 적용하였다.

물리적 풍화는 구조적인 요인을 제외하고 기후요소에 의해 나타날 수 있는 영향을 분석하였고 지표로 사용될 결빙일수를 산출하기 위해 기온, 강수량, 서리일수 및 동결일수를 분석하였다. 화학적 풍화는 강수량과 기온에 크게 영향을 받으므로 이들 요소의 과거 대비 미래 변화를 파악하여 광역적인 결과를 전망하였다. 마지막으로 생물학적 풍화는 기온과 강수량에 따른 단위 석조유산 당 생물체량

(biomass)과 지의류 종풍부도(lichen species richness) 지수를 이용하여 분석하였다.

미래 기후 자료는 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 모델의 RCP4.5 시나리오에 의한 남한상세 지역 기후자료를 이용하였다(Korea Meteorological Administration, 2014). 미래기후(2071~2100년)와 과거 평년기후(1981~2010년)를 지역별로 비교하기 위해 평년기후 자료가 확보된 국내 55개 지역을 연구지역으로 선정하였다(Table 1). 또한 기존에 풍화도가 조사된 513개의 국보 및 보물 석조유산을 기후의 각 지역적 특성과 연관하여 손상을 예측하였다(The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage, 2001; 2002; 2003; 2004; 2005). 이들의 공간분석과 지도 작성을 위해 ArcGIS Desktop10.2(ESRI사)를 활용하였다.

## 3. 선행연구 분석

### 3.1. 국내외 동향

기후변화에 의한 문화유산의 손상 영향은 유럽 국가를 중심으로 처음 본격적으로 시작되었다. 유럽위원회(European Commission)는 제6차와 제7차 연구프로그램을 통해 NOAH's Ark(제6차 Framework, 2002~2007년)와 Climate for Culture(제7차 Framework, 2009~2014년) 프로젝트를 지원하였다. 이 연구들은 기후변화에 의한 문화유산의 총체적 위험을 평가하고 영향을 분석한 것으로써 독일, 영국, 이탈리아 등 유럽의 주요 20여 개국이 공동참여한 대형 프

로젝트였다(Institute of Atmospheric Sciences and Climate, 2002; Fraunhofer, 2014).

초기 Noah's Ark에서는 석조, 목조, 금속, 유리 등 주요 옥외 문화유산의 재료에 따라 기후변화의 영향을 광역적으로 분석하고 위험지도를 작성하는 한편 과거 기후와 오늘날 손상상태 간의 상관관계를 연구하여 기후변화 영향에 대한 과학적 증거를 확보하였다(Institute of Atmospheric Sciences and Climate, 2002; Sabbioni *et al.*, 2012). 이후 후속된 Climate for Culture에서는 이전의 위험지도에 대한 정밀도와 해상도를 높이는 동시에 문화유산의 손상에 직접적으로 영향을 미치는 기후인자들의 미래 자료를 생산하는 것은 물론 이들의 공간적 변화를 약 2만장의 고해상도 지도에 표현하여 방대한 기후자료 데이터베이스를 구축하였다. 또한 이 연구에서는 이전 연구에서 고려되지 않았던 박물관이나 역사건축물의 실내 환경변화에도 주목하여 기후변화 영향을 시뮬레이션 할 수 있는 다양한 기법과 모델링 소프트웨어를 개발하고 효율적인 보존환경을 조성하기 위한 실제적 응용연구를 진행하였다(Fraunhofer, 2014).

영국 공학자연과학연구회(Engineering and Physical Sciences Research Council)는 지구온난화로 인해 역사건축물의 훼손이 가속화되고 있음을 심각하게 인지하고 2000년부터 이에 대비하기 위한 연구프로그램을 자체적으로 개발하여 시행하였다(Viles, 2002). 또한 옥스퍼드대학의 지리환경대학(School of Geography and the Environment, University of Oxford)에서는 1991년에 환경변화연구소(Environmental Change Institute)를 설립하여 세계적인 기후변화 연구기관인 Tyndall Center와 공동으로 영국기후영향프로그램(UK Climate Impacts Programme)을 수행하여 신뢰도 높은 다양한 기후예측모델을 개발하고 문화유산을 포함한 미래 정책방향을 영국 정부에 제안한 바 있다(Environmental Change Institute, 2013).

호주는 2008년에 국제기념물유적협의회(ICOMOS-Australia)를 중심으로 기후변화 대응 문화재 보존정책을 입안하였으며 지역별 및 국가별 파급효과 분석과 문화유산의 보존관리 방안을 제안하였다(Australia ICOMOS, 2013). 가까운 일본에서는 환경변화로 인한 자연경관과 생태환경의 훼손을 막기 위해 Frontier Research Center for Global Change(FRCGC) 프로그램을 실시하면서 중점 보존대상에 문화유산과 역사도시를 포함시켰다.

이처럼 선진국을 중심으로 문화유산 기후변화 영향에

대한 전지구적인 관심이 고조됨에 따라 국제사회의 움직임도 가속화되었다. 2006년 국제연합교육과학문화기구(UNESCO)는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change), 국제기념물유적협의회(ICOMOS, International Council on Monuments and Sites), 국제문화재보존복원연구소(ICROM, International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property)와 함께 기후변화로 인한 세계유산의 위험을 공개적으로 논의하고 이에 대한 인식을 확산하기 위해 기후변화 피해사례집을 발간하였다(UNESCO, 2007).

또한 여러 개인연구자들에 의해 미래 기후변화 분석을 통한 역사건축물의 습기문제, 대리암 문화재의 열용량 변화로 인한 손상, 탄산염암 문화재의 표면풍화, 바람에 의한 침식, 박물관 소장품의 기후변화 영향 등에 대한 다양한 연구가 수행되었다(Grossi *et al.*, 2006; 2008; Bonazza *et al.*, 2009a; 2009b; Huijbregts *et al.*, 2012; Raphael *et al.*, 2012).

초기에 기후변화의 문화유산 영향 연구는 기온, 강수, 염, 동결, 생물 등에 의해 일어날 수 있는 변화를 최근 30년과 비교하여 광역 지도에 투영함으로써 전반적인 변화를 파악하는데 집중하였다. 이후 역사 기후자료와 현재 문화유산의 손상상태의 상관성을 해석하여 기후변수를 이용한 손상지수를 개발하였다. 오늘날에는 문화유산의 손상 유형별로 연구가 보다 세분화되어 이전보다 더욱 정밀하고 과학적인 데이터를 산출할 뿐만 아니라 문화유산을 위한 기후변화 연구를 별도로 진행하여 자체적인 미래 기후자료를 생산하기에 이르렀다(Fraunhofer, 2014).

우리나라는 2008년 한반도 기후변화대응 국가연구개발 중장기 종합기본계획에서 기후변화 영향평가 및 적응연구 부문에 문화재기술을 채택하여 중요성을 인식하였고(National Research Institute of Cultural Heritage, 2012), 2010년 저탄소녹색성장기본법(2010.4.17)의 시행과 함께 법정 국가 대응정책으로 제1차 국가기후변화적응대책(2010년)과 제2차 국가기후변화적응대책(2015년)을 수립하였다. 특히 제2차 대책에서는 20개 주요정책과제 중 3개의 과제에 문화재청의 역할과 참여가 포함되었다(Ministry of Strategy and Finance *et al.*, 2015). 이 내용을 살펴보면 기후변화에 따른 생태계 영향에 대비하여 천연기념물과 명승지 등에 대해 모니터링을 강화하고 효율적인 모니터링 체계의 구축과 생물종의 보존, 복원, 연구 및 관리를 강화하는 내용이 주요 골자로서 문화유산은 제외되었다.

**Table 2.** Predicted impacts on stone heritage by climate change.

Climate parameter	Predicted impacts on stone heritage
Temperature increase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Change in freeze-thaw and frost damage</li> <li>• Increase of thermal stress on stone surface</li> <li>• Acceleration of chemical weathering process</li> <li>• Change in biological colony and distribution</li> <li>• Expanding of existing species and appearance of new species</li> </ul>
Humidity increase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase in time of wetness</li> <li>• Change in salt crystallization and dissolution</li> <li>• Increase in mould growth</li> </ul>
Rainfall and intensity increase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increase of landslide, collapse and destruction of stone structure by heavy rainfall</li> <li>• Increase of mineral dissolution</li> <li>• Change in mould and lichen colonies on stone</li> <li>• Rain wash of contaminants on stone</li> </ul>
Sea level rise	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permanent submersion of heritage in low lying areas</li> <li>• Increase of sea salt deterioration in coastal heritage</li> </ul>

국내 연구는 2010년 이후 문화재청의 주도로 기획연구와 대책수립 연구가 이루어졌고(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011; 2012; Cultural Heritage Administration, 2012a), 기후변화에 따른 자연재해의 증가와 더불어 문화재 피해사례가 자주 보고됨에 따라 방재 대책과 방재교육이 함께 이루어져 왔다(Cultural Heritage Administration, 2005; 2012b; Cultural Heritage Administration and Chungnam Province, 2013). 이들은 대부분 기후변화에 의한 비일상적인 자연재해에 따른 재해위험도 평가와 대책을 중심으로 논의되어 왔을 뿐 향후 문화재의 재질변화와 손상에 점진적으로 어떠한 변화가 일어날지에 대해서는 충분한 논의가 이루어지지 못하였다(Kim *et al.*, 2014).

### 3.2. 석조유산에 대한 영향

기후변화는 지구온난화현상, 즉 기온 상승을 내포하는 말로써 그 영향은 대표적으로 기후구의 변화를 가져온다. 우리나라의 경우 오늘날 제주와 전남 일부 지역만 포함되던 아열대 기후구가 해가 갈수록 북방 경계선이 점차 북상하면서 미래(2100년)에는 주요 산지를 제외한 내륙 지역까지 확대될 것이라 한다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 이는 동식물 생태계에 직접적인 영향을 미쳐 목조문화재 가해 생물인 흰개미에 의한 피해 지역의 확장과 소나무 식생지역의 축소로 인한 복원수 감소로 이어진다. 또한 미생물의 서식환경도 변화하여 아열대 병해충의 유입과 이로 인해 문화재에 새로운 피해 양상을 출현

시킬 수도 있다.

예측된 자료에 따르면 한반도 기온은 A1B 시나리오를 적용할 경우 21세기 말(2071~2100) 현재와 비교하여 평균 약 4°C 상승하며 내륙지역은 상승률이 더욱 커 최대 8°C까지 올라갈 것으로 전망되어 지역별 편차가 크다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 평균기온이 전 국토에 일률적으로 4°C 증가할 경우 생물학적 및 화학적 풍화는 가속화될 것이고 반대로 동결로 인한 물리적 풍화는 감소할 것으로 예상된다. 그러나 이 같은 예측은 지역 기후의 특수성을 고려한다면 보다 다양한 양상으로 전개될 가능성이 있다. 현재 동결-융해 풍화가 빈번하게 발생하는 0°C 전후의 기후환경을 가진 지역은 전반적인 기온상승으로 인해 평균기온이 영상으로 올라가 피해가 감소할 것이나 저온지역(-4°C 이하)은 기온이 0°C 부근으로 상승함에 따라 오히려 동결-융해 작용이 빈번해질 수 있다(Camuffo, 1998; Viles, 2002). 한편 해안에 가까이 위치한 석조유산은 해수면 상승으로 염풍화의 영향 지역이 내륙으로 확장될 것이며(Gustafsson, 1997; Cole *et al.*, 2003; Sabbioni *et al.*, 2012) 동북아시아 내륙의 사막화가 진행되면 국내 황사의 농도와 발생빈도의 증가로 이어져 석조유산에 표면변색을 심화시킬 것으로 예상할 수 있다.

미래 한반도의 강수량은 20세기 말(1971~2000년) 대비 21세기 말(2071~2100년)에 전반적으로 평균 17% 증가되며 강수강도는 강원, 경기 및 남해에서 증가하고 충청, 경북, 호남에서는 감소할 것으로 예측되고 있다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 강수량 증가에 따라 석조유산의 표면오염물은 자연적으로 세정(rain

wash)되는 긍정적인 효과도 기대되나, 이와 반대로 암석성분의 화학적 용해와 풍화의 반응속도를 증가시키는 역할도 예상할 수 있다(Viles, 2002; Smith *et al.*, 2011). 한편 강수량의 증가로 강원, 경기, 남해 지역의 석조유산의 폭우 재해 위험도가 높아질 것이다.

최근 들어 점차 높은 빈도로 나타나고 있는 여름철 폭염은 미래에 더욱 증가할 것이라 한다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 강한 일사에 의한 폭염은 암석 표면의 온도를 빠르게 상승시키는데, 상승속도와 최대온도는 암석의 색상, 광물조성 등에 따라 달라지나 보통 일 최고기온의 2배 이상까지 상승한다고 한다. 암석의 표면온도가 상승하였을 때 갑작스럽게 소나기가 내리면 가열된 암석 표면이 급격히 냉각되면서 가열-냉각 효과에 의한 박락이 일어나고 박락의 발생율은 화강암이 사암보다 훨씬 높다고 한다(Viles, 2005; Gomez-Heras *et al.*, 2006). 주요 기후인자에 따른 석조유산에 대한 영향을 Table 2에 정리하였다.

## 4. 국내 석조유산의 손상 가능성

### 4.1. 화학적 풍화

기온과 강수량이 증가하면 물-암석 간의 반응속도가 빨라지고 더 많은 광물성분의 용출이 일어난다. 우리나라의 과거 평년기온과 강수량을 토대로 남한에 분포하는 513개 석조유산의 화학적 풍화 가능성을 분석해보면(Fookes *et*

*al.*, 1971; Kim, 2009), 우리나라 석조유산은 대부분 ‘동결작용이 있는 중간풍화(Moderate decomposition with frost action)’, ‘중간풍화(Moderate decomposition)’, ‘강한풍화(Strong decomposition)’ 영역대에 골고루 도시되었다(Figure 2). 이 중 ‘중간풍화’ 영역에 전체 513기 중 51%의 석조유산이 분포하고, ‘동결작용이 있는 중간 풍화’ 영역대에는 28%가 분포하였다.

그러나 미래에 기온상승과 강수량 증가가 수반될 경우 대부분의 석조유산은 강한 화학적 풍화잠재력을 갖게 될 것으로 전망된다. 특히 ‘동결작용이 있는 중간풍화’ 영역대와 ‘중간풍화’ 영역대의 석조유산들이 모두 ‘강한풍화’ 영역대로 이동하면서 전체 513개 중 88%에 해당하는 석조유산이 강한 화학적 풍화환경에 노출될 가능성이 있는 것으로 전망된다(Figure 2).

### 4.2. 생물학적 풍화

생물에 의한 암석의 풍화는 생물막(biofilm)의 형성에 서부터 시작된다(Characklis and Marshall, 1990). 생물막은 미생물과 체외고분자물질(EPS: extracellular polymeric substances)로 이루어져 암석 표면에 막을 형성하고 광물의 용해를 일으켜 다음 단계의 생물 친이를 유도하기 때문에 생물 풍화에 전구적인 역할을 한다(Warscheid and Hallet, 2000). 석조유산의 생물학적 풍화에 영향을 미치는 인자는 암석의 강도, 흡수율, 공극률, 광물조성, pH 등과 같은 암석의 물리화학적 특성과 생물종의 종류 및 지역기후 등 환경적 요

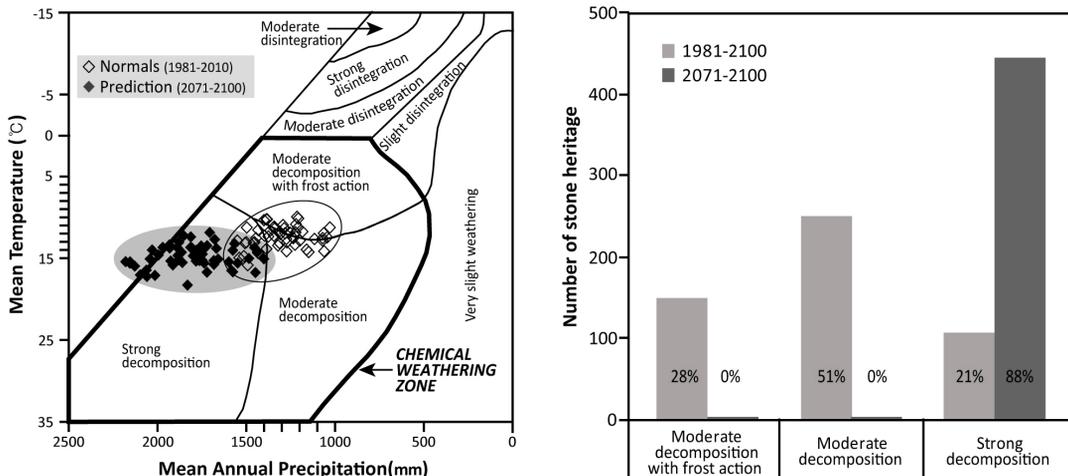


Figure 2. Chemical weathering zone by temperature and precipitation(after Fookes *et al.*, 1971).

**Table 3.** Biomass of biofilm (mg·cm<sup>-2</sup>) and lichen species richness on stone heritage.

	Biomass (mg·cm <sup>-2</sup> )		Lichen species richness	
	1981~2010	2071~2100	1981~2010	2071~2100
Average	18.3	87.0	70.8	50.0
Maximum	35.8	229.6	80.7	72.3
Minimum	7.5	21.9	56.2	45.7
Standard deviation	7.3	52.0	5.5	5.7

소이다.

생물은 일사, 기온, 강수량에 따라 생물활성도에 민감하게 영향을 받기 때문에 기후인자는 석조유산의 생물학적 풍화 메커니즘을 이해하는데 중요한 지표이다. 또한 지의류는 기후환경에 따라 뚜렷한 콜로니화 특성을 나타내어 석조유산의 생물수용성(bioreceptivity)을 평가하는데 중요한 지표종으로 사용되고 있다(Nimis and Monte, 1988; Prieto and Silva, 2005). 유럽연합은 이전의 Noah's Ark 프로젝트에서 기후와 생물풍화도 간의 상관관계를 분석하여 석조유산 표면에 생물막의 생물체량(biomass)과 지의류의 종풍부도(species richness) 산출식을 개발하였다(Sabbioni *et al.*, 2012). 위 연구결과에서는 신뢰성과 대표성을 확보하기 위해 다양한 해발고도(110~2263 m), 지형 및 지리(해안과 내륙), 연강수량(371~1197 mm, 평균 711 mm), 연평균기온(7.3~16.8℃, 평균 11.2℃)을 가진 지역을 연구대상으로 골고루 포함시켰다(Sabbioni *et al.*, 2012). 산출된 생물체량은 아래 수식에서 보는 바와 같이 강수량 및 기온과 밀접한 상관성을 보이며 지의류 종풍부도는 기온에 대한 의존성이 절대적이다.

$$\text{Biomass (mg·cm}^{-2}\text{)} = e^{(-0.964 + (0.003 \times P) - 0.01 \times T)}$$

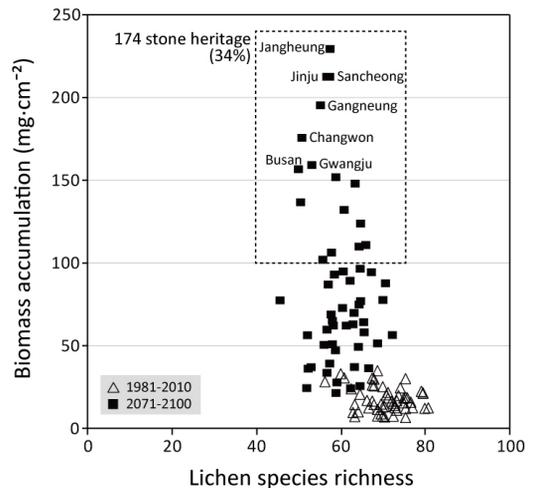
*P*: Annual precipitation in mm

*T*: Annual average temperature in Celsius

$$\text{Lichen species richness} = 121.823 - 4.154 \times T$$

*T*: Annual average temperature in Celsius

우리나라 지역별 평년기후(1981~2010년)와 기후변화 시나리오에 의해 산출된 남한의 미래기후(2071~2100년) 자료를 토대로 생물체량과 종풍부도를 산출해보면(Table 3, Figure 3), 과거 석조유산 표면의 생물체량은 평균 18.3 mg·cm<sup>-2</sup>, 최대 35.8 mg·cm<sup>-2</sup>, 최소 7.5 mg·cm<sup>-2</sup>이며, 표준편차는 7.3



**Figure 3.** Calculated biomass and lichen species richness in the past and future.

mg·cm<sup>-2</sup>이었다. 예측된 미래기후에 대입한 값은 평균 87.0 mg·cm<sup>-2</sup>, 최대 229.6 mg·cm<sup>-2</sup>, 최소 21.9 mg·cm<sup>-2</sup>, 표준편차 52.0 mg·cm<sup>-2</sup>로써 과거에 비해 4.6배 크게 증가할 뿐만 아니라 지역 기후에 따라 편차가 매우 크다. 지의류 종풍부도는 과거에 평균 70.8종, 최대 80.7종, 최소 56.2종으로 산출되었으나 미래에는 평균 50종으로 약 29% 감소하는 것으로 나타난다.

미래의 기온 증가는 석조유산 표면에 지의류 종수를 감소시키는 한편 강수량 증가는 하등생물에 의한 표면오염도를 증가시킬 가능성이 있음을 알 수 있다. 특히 생물체량은 지역에 따라 증가율이 최대 7배(장흥, 진주, 강릉, 광주, 영주, 속초)까지 늘어나고 과거 평균값의 5배 이상에 해당하는 100 mg·cm<sup>-2</sup> 이상의 값이 예측된 지역은 총 55개 중 16개 지역으로 174(34%)기의 국보 및 보물 석조유산이 소재하고 있다.

### 4.3. 물리적 풍화

암석의 물리적 풍화는 절리와 같이 상부 압력의 제거로 발생하는 구조적인 유형과 박락과 같은 소규모로 일어나는 물리적인 유형이 있다. 후자의 경우 석조유산 손상의 주된 원인인 자 기온과 수분의 존재 여부가 크게 영향을 미친다(Honeyborne, 1990). 따라서 미래에 기온과 강수량의 변화에 따른 동결융해와 서릿발 작용의 영향을 분석하였다. 2011년과 2100년 기온자료를 토대로 일 최고기온이 영하로 떨어지는 날의 출현빈도를 기준으로 결빙일수를 산출하였다. 그 결과 2011년에는 강원도 대부분의 지역과 경기 일부지역 및 남부지방의 산악지역을 중심으로 연중 결빙일수가 40일 이상 출현하였으나 2100년에는 강원도 산

악지역 일부에서만 높은 결빙일수를 보일 뿐 중남부 대부분의 지역은 20일 이하의 낮은 결빙일수를 나타냈다 (Figure 4).

암석의 물리적인 풍화에 중요한 인자인 서릿발 작용의 영향을 분석해보면 2011년에는 서리일수가 연중 절반에 해당하는 180일 이상이 강원도 지역에 광범위하게 분포하였으나 2100년에는 이들 높은 서리일수 지역이 거의 없어지고 강원지역을 제외한 남한 대부분 지방이 낮은 서리일수로 평균화되어 가는 경향을 보인다(Figure 4). 결빙과 서릿발 작용의 감소는 미래의 기온 상승에 의한 직접적인 결과라고 볼 수 있다.

기온이 영하 이하로 하강하여 장기간 유지되더라도 수분이 공급되지 않으면 결빙에 의한 물리적 풍화는 일어나

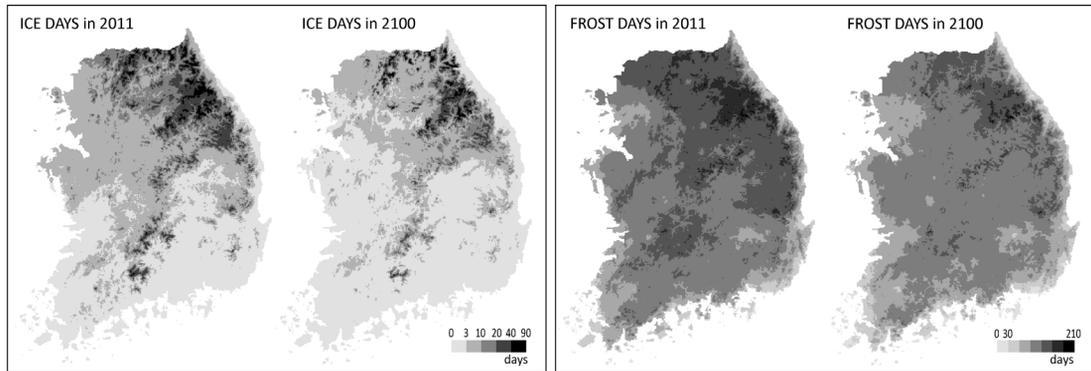


Figure 4. Ice days and frost days in the past and future(Meterological Administration, 2014).

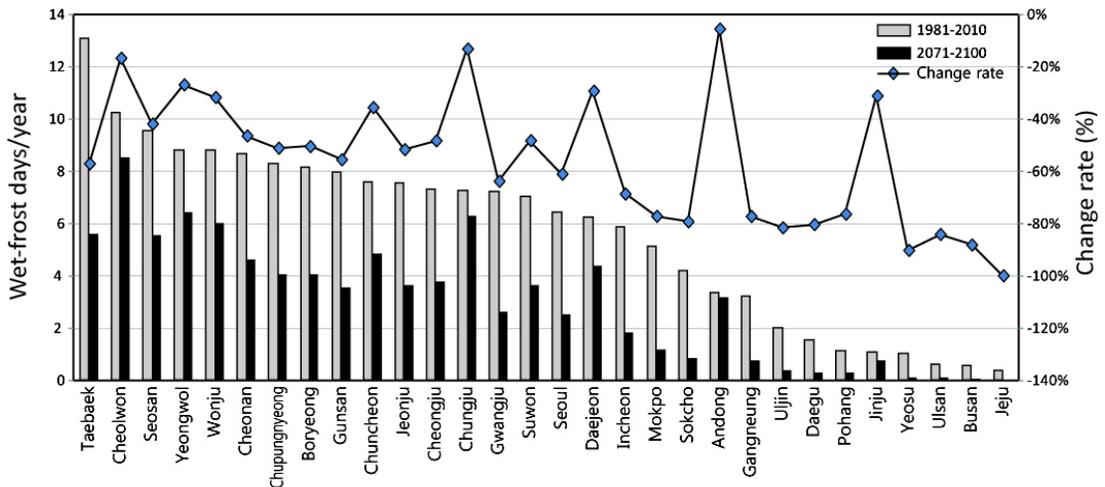


Figure 5. Change in wet-frost days for the past(1981~2010) and future(2071~2100).

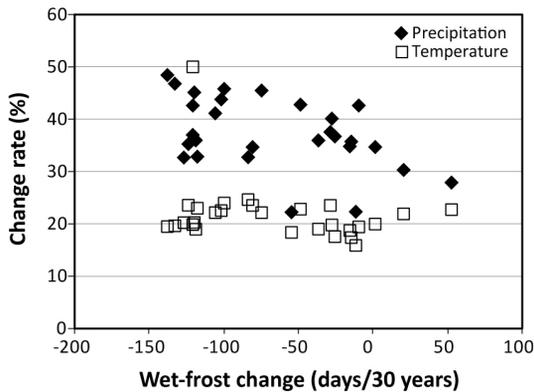


Figure 6. Correlation of wet-frost days with precipitation-temperature changes.

기 어렵다(Brimblecombe *et al.*, 2006). 물의 결빙에 의한 암석의 물리적 풍화 가능성을 분석하기 위해 과거 30년(1981~2010년)과 미래 30년(2071~2100년) 기간 중 일일 1 mm 이상의 강우가 발생한 후 익일 평균기온이 영하로 떨어지는 일수를 산출하였다(Grossi *et al.*, 2007). 연구대상 55개 지역 중 주요 30개 지역을 선택하여 물의 결빙일수를 추출한 결과 남한 대부분의 지역에서 일수가 감소하는 것으로 나타났다(Figure 5).

특히 대부분의 지역에서 결빙일수가 50% 이상 크게 감소하고 이러한 도시들은 해안가에 위치하고 있거나 내륙의 대도시들이다. 결빙일수 감소율이 낮은 지역은 철원, 영월, 안동, 대전, 충주, 진주로써 지역적인 편차이나 경향성이 뚜렷하지 않다. 이 지역들 관내와 인근 지역 내에는 국보 및 보물 석조문화재가 30기 소재하고 있고 풍화등급은 평균 3등급이나 4등급 이상도 7기 분포한다. 이들 석조유산은 미래에 물의 결빙에 의한 미세균열과 박락이 과거와 유사한 수준으로 지속될 가능성이 있다.

미래의 결빙일수는 과거(1981~2010년) 물의 결빙일수가 적었던 지역일수록 현저히 줄어드는 경향이 있다. 또한 기온 변화는 과거와 미래의 결빙일수 차이에 크게 영향을 미치지 않고 일정한 반면 강수량의 차이는 결빙일수 차이와 상관성을 보인다. 즉 강수량이 많이 증가하는 지역일수록 결빙일수가 많이 감소하고 영월, 철원과 같이 강수량 증가가 적은 지역은 결빙일수가 오히려 증가한다(Figure 6). 눈을 포함한 강수량이 많은 지역에서 결빙작용의 발생빈도가 더욱 높을 것으로 예상하였으나 실제 분석에서는 반대의 결과가 나타난 것이다. 이는 물의 결빙작용에 의한 암석의 박락 가능성이 강수량 총량보다 강수 빈도와 같은 다

른 인자에 의해 제어될 가능성이 있음을 지시하며 이에 대해 향후 정밀분석이 필요하다.

## 5. 고찰

기후변화로 야기되는 석조유산의 풍화 영향은 매우 복합적이다. 지역적 편차를 고려하지 않고 기온과 강수량이 일률적으로 상승 또는 하강할지라도 물리적, 화학적, 생물학적인 관점에서 예측되는 결과는 제각기 다르다. 예를 들어 강수량과 강수강도의 증가는 석조유산 표면의 변색오염물을 자연적으로 제거해주는 효과가 있으나, 다른 한편으로 미생물의 성장을 촉진하여 생물학적 풍화를 가속시킬 수 있다. 동시에 폭우로 인한 재해의 위험성도 고려되지 않을 수 없다.

미래에 강수량과 기온 증가로 인해 우리나라 석조유산은 강한 화학적 풍화를 받는 환경에 노출되고 취약성이 증가할 것으로 예측된다. 또한 지의류 종풍부도는 감소하나 석조 표면의 단위면적당 생물체량이 증가할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 다만 분석에 이용된 산출식이 우리나라보다 연평균 강수량이 다소 낮은 환경에서 개발되었음을 감안한다면 실제 우리나라 석조유산에서는 다른 양상으로 전개될 가능성도 충분하다. 만약 강수량 증가로 인한 지의류 종수 감소와 생물체량의 증가가 일어난다면 앞으로 보존처리 연구와 산업 분야에도 변화를 가져올 수 있다. 우리나라 석조유산의 보수 또는 보존처리 사례를 보면 생물체 제거를 위한 세정처리가 가장 많은 건수를 차지한다(Lee *et al.*, 2013). 미래에 생물체량이 수배 증가한다는 것은 곧 석조유산의 세정주기가 짧아질 수 있음을 의미하고 이는 보존과학 분야 산업의 변화와 더불어 석조유산 관리비용의 증가로 이어질 수 있다.

한반도의 전반적인 기온상승은 석조유산의 동결피해를 광역적으로 줄이는 긍정적 효과를 기대할 수 있다. 그러나 물의 결빙일수 분석 결과에서 보듯이 지역적인 편차가 존재하여 일부 지역에서는 미래에 동결일수가 크게 줄지 않고 과거와 유사한 수준으로 유지되는 것으로 전망되었다. 또한 인구밀도가 높고 도시가 발달된 지역은 비도심에 비해 기온 변화의 영향이 상대적으로 미약하다. 이는 기후에 의한 석조유산의 풍화 연구에 있어 지역 기후의 영향이 중요하게 고려되어야 함을 지시한다.

지역적 특수성 외에도 기후자료의 주기도 중요한 문제이다. 겨울철 동결이 석조유산의 표면풍화를 일으킨다는 것은 이론과 실험연구를 통해 이미 검증되었으나 동결에

의한 영향과 취약성을 정량적으로 평가하는 것은 기후자료의 정밀성과 연결된다(Honeyborne, 1990; Hall, 2004; Grossi *et al.*, 2007). 동결에 의한 풍화강도와 속도는 암석의 물리화학적 특성뿐만 아니라 수분의 공급량, 동결 온도, 동결 유지시간, 동결-융해 주기 등 다양한 기후적 요소가 영향을 미친다(Walder and Hallet, 1985; Hall, 2004; Brimblecombe *et al.*, 2006; Grossi *et al.*, 2007). 이들을 고려하여 정밀한 분석을 하기 위해서는 최소한 매시간 주기의 미래 기온 자료가 확보되어야 한다. 기후자료는 시나리오에 따라 생성하는 것에서부터 데이터 분석까지 매우 복잡하고 방대한 작업이기 때문에 자료처리와 유효한 데이터의 추출에 많은 시간이 소요된다. 이를 해결하기 위해서는 보존과학 연구자와 기후변화 전문가, 기상학자, 자료처리 전문가의 학제연구가 있어야만 가능하다.

이 연구에서 다루지 않았으나 기후변화에 의한 문화재 재해도 앞으로 연구되어야 할 중요한 분야이다. 기후 예측 자료에 의하면 미래에는 강수량뿐만 아니라 강수강도가 현저히 증가한다고 한다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 강수강도가 증가하면 마에불과 같은 석조유산의 갑작스런 도피나 홍수로 인한 침수, 산사태로 인한 재해 위험성이 증가하게 된다. 재해는 일회성으로도 충분히 심각한 피해를 입힐 수 있기 때문에 앞으로 기상재해 전문가와 함께 심도있게 다루어져야 한다.

## 6. 결 론

이 연구는 앞으로 100년 내에 일어날 기후변화를 전제로 석조유산의 변화를 몇몇 제한된 영향인자를 통해 대략적으로 전망하였다. 본 연구에서 이용된 분석방법이 우리나라 석조유산과 환경 및 재질 측면에서 다른 조건을 갖고 있어 여기에서 분석된 결과만 가지고 기후변화가 앞으로 한국의 석조유산의 보존에 유리하게 작용할지, 풍화를 가속하여 부정적인 결과를 초래할지 아직은 단정지어 말하기 어렵다. 그러나 과거와 미래의 비교를 통해 대략적인 변화를 짚어보고 앞으로 과제를 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 기후는 현재에도 변화하고 있고, 과거에 이미 배출된 이산화탄소는 앞으로 최소 100~200년 동안 전지구에 영향을 미칠 것으로 전망되고 있기 때문에 석조유산과 다른 문화유산의 손상에도 변화를 가져올 것임은 분명하다(National Institute of Meteorological Research, 2009).

2015년 말 제2차 국가기후변화적응대책을 마련하면서 우리나라 기후변화에 따른 각 분야별 리스크 평가가 이루어

어졌다. 먼저 문헌과 연구사례를 분석하여 280여개 리스크 목록을 추출한 다음 파급영향을 평가하고 주요 7개 부분(건강, 물, 산림/생태계, 국토/연안, 산업/에너지, 농축산, 해양/수산)을 선정하여 최종 87개의 우선 대응 리스크 목록을 작성하였다. 여기에 천연기념물을 제외한 문화유산은 제외되어 있다. 이 분야 연구의 미진을 반증하는 것이다. 앞으로 미래기후에 대한 정밀한 자료가 산출되고 석조유산에 영향을 미치는 기후-풍화지수가 개발되어 손상요인별로 세분화된 정밀예측이 이루어야 한다.

기후변화가 일어나면 가장 빠르고 즉각적으로 영향을 받는 문화유산은 외부환경에 노출된 석조와 목조유산일 것이다. 석조유산은 목조에 비해 손상속도가 느리고 주재료인 암석의 풍화는 지질학적 타임스케일에서 논의되는 것이 일반적이다. 그러나 우리는 지난 100년 동안 일어난 석조유산의 손상이 산업화 이전 1000년 동안 일어난 손상보다 빨리 진행되었다는 것을 알고 있다(Smith *et al.*, 2008; Andre and Phalip, 2010). 석조유산 보존의 미래 1000년을 준비해야 한다.

## 사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A6A3A03065288).

## REFERENCES

- Andre, M.F. and Phalip, B., 2010, Rates of stone recession on Mediaeval monuments: some thoughts and methodological perspectives. *Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe, Coruna*, 35, 13-40.
- Australia ICOMOS, 2013, <http://australia.icomos.org/>
- Bonazza, A., Messina, P., Sabbionia, C., Grossi, C.M. and Brimblecombe, P., 2009a, Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe. *Science of the Total Environment*, 407, 2039-2050.
- Bonazza, A., Sabbioni, C., Messina, P., Guaraldi, C. and De Nuntiis, P., 2009b, Climate change impact: Mapping thermal stress on Carrara marble in Europe. *Science of the Total Environment*, 407, 4506-4512.
- Brimblecombe, P., Grossi, C.M. and Harris, I., 2006, Climate

- change critical to cultural heritage. In: R. Fort, M. Alvarez de Buergo, C. Gomez-Heras and C. Vazquez-Calvo (eds.), *Heritage, weathering and conservation*, Balkema, Rotterdam, 387-393.
- Camuffo, D., 1998, *Microclimate for Cultural Heritage*. Elsevier, Amsterdam, 11.
- Characklis, W. G. and Marshall, K. C., 1990, Biofilms: a basis for an interdisciplinary approach. In W. G. Characklis and K. C. Marshall(eds.), *Biofilms*, John Wiley & Sons, New York, 3-15.
- Cole, I.S., Paterson, D.A., Ganther, W., Hinton, B., McAdam, G., McGeachie, M., Jeffrey, R., Chotimongkol, L., Bhamornsut, C., Hue, N.V. and Purwadaria, S., 2003, *Corrosion Engineering. Science & Technology*, 38, 267-274.
- Cultural Heritage Administration, 2005, Statistics of natural hazards on cultural heritage for recent three years. 1-5. (in Korean)
- Cultural Heritage Administration, 2012a, Establishment of comprehensive countermeasures for conservation of cultural heritage for adaptation to climate change. 1-304. (in Korean)
- Cultural Heritage Administration, 2012b, Research on teaching material and program development for disaster prevention in cultural heritage. 1-228. (in Korean)
- Cultural Heritage Administration and Chungnam Province, 2013, Safety management of cultural heritage. 1-136. (in Korean)
- Environmental Change Institute, 2013, Climate Research. <http://www.eci.ox.ac.uk/research/climate/>
- Fookes, P.G., Dearman, W.R. and Franklin, J.A., 1971, Some engineering aspects of rock weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 4, 139-185.
- Fraunhofer, 2014, Climate for Culture. <http://www.climateforculture.eu/>
- Gomez-Heras, M., Smith, B.J. and Fort, R., 2006, Surface temperature difference between minerals in crystalline rocks: implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology*, 78, 236-249.
- Grossi, C.M., Bonazza, A., Brimblecombe, P., Harris, I. and Sabbioni, C., 2008, Predicting twenty-first century recession of architectural limestone in European cities. *Environmental Geology*, 56, 455-461.
- Grossi, C.M. and Brimblecombe, P., 2006, The effect of long-term trends in dampness on historic buildings. *Weather*, 61, 278-281.
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P. and Harris, I., 2007, Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 377, 273-291.
- Gustafsson, M.E.R., 1997, Raised levels of marine aerosol deposition owing to increased storm frequency; a cause of forest decline in southern Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84, 169-177.
- Hall, K., 2004, Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada. *Earth Surface Processes and Landform*, 29, 43-57.
- Honeyborne, D.B., 1990, Weathering and decay of masonry. In: Ashurt and F.G. Dimes(eds.), *Conservation of Building and decorative stones*, Butterworth, Oxford, 153-178.
- Huijbregts, Z., Kramer, R.P., Martens, M.H.J., Schijndel, A.W.M. and Schellen, H.L., 2012, A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings. *Building and Environment*, 55, 43-56.
- Institute of Atmospheric Sciences and Climate, 2002, NOAH's Ark: Global climate change impact on built heritage and cultural landscapes. <http://noahsark.isac.cnr.it/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2016, [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/)
- Jun, B.K., Ham, M.S., Lee, J.J. and Song, C.Y., 2006, Present state and statistical analysis of stone cultural heritage by national appointment in Republic of Korea. *Conservation Studies*, 27, 43-61. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., 2009, *Geomorphology*. Dongkuk University Press, Seoul, 81. (in Korean)
- Kim, Y.H., Jeon, S.K., Lee, M.S. and Nam, G.J., 2014, Analysis of evaluation for flood risk architectural heritage. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(1), 11-18. (in Korean with English abstract)
- Korea Environmental Institute, 2010, Forum operating for establishment of basic plan for adaptation to climate change. 1-145. (in Korean)

- Lee, M.S., Chun, Y.G., Lee, M.H. and Lee, J.M., 2013, Relationship between deterioration state and conservation treatment types for state-designated stone cultural heritage in Korea. *Conservation Studies*, 34, 64-81. (in Korean with English abstract)
- Korea Meteorological Administration, 2014, Climate Information <http://www.climate.go.kr/>
- Ministry of Strategy and Finance, Ministry of Education, Ministry of Science, ICT and Future Planning, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Unification, Ministry of National Defence, Ministry of Government Administration and Home Affairs, Ministry of Culture, Sports and Tourism, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ministry of Trade, Industry and Energy, Ministry of Health and Welfare, Ministry of Environment, Ministry of Employment and Labor, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Ministry of Oceans and Fisheries, Ministry of Public Safety and Security, Meteorological Administration, Rural Development Administration, Korea Forest Service and Cultural Heritage Administration, 2015, The second national strategy for adaptation to climate change(2016~2020). 61-147. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Cultural heritage technology strategy plan responding to climate change. 3-184. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2012, Comprehensive countermeasures in cultural heritage conservation for adaptation to climate change. Unpublished. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Meteorological Research, 2009, Understanding climate change. 2, 60-73. (in Korean)
- Nimis, P.L. and Monte, M., 1988, The lichen vegetation on the Cathedral of Orvieto (Central Italy). *Studia Geobotanica*, 8, 77-87.
- Prieto, B. and Silva, B., 2005, Estimation of the potential bioreceptivity of granitic rocks from their intrinsic properties. *International Biodeterioration and Degradation*, 56, 206-215.
- Raphaël, D.J.M., Koster, T. and Geurts, C.P.W., 2012, The effect of climate change and natural variability on wind loading values for buildings. *Building and Environment*, 55, 178-186.
- Sabbioni, C., Brimblecombe, P. and Cassar, M., 2012, The atlas of climate change impact on European cultural heritage. Anthem Press, New York, 113-134.
- Smith, B.J., Gomez-Heras, M. and McCabe, S., 2008, Understanding the decay of stone-built cultural heritage. *Progress in Physical Geography*, 32, 439-461.
- Smith, B.J., Srinivasan, S., Gomez-Heras, M., Basheer, P.A.M. and Viles, H.A., 2011, Near-surface temperature cycling of stone and its implications for scales of surface deterioration. *Geomorphology*, 130, 76-82.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.), 2007, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 435-497.
- The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage, 2001-2005, Study on conservation and management of stone cultural heritage. Cultural Heritage Administration. (in Korean)
- UNESCO, 2007, Case studies on climate change and world heritage. 56-75.
- Viles, H.A., 2002, Implication of future climate change for stone deterioration, Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies. In Eds. (Siegesmund, S., Weiss, T. and Vollbrecht, A.), *Geological Society, London, Special Publications*, 205, 407-418.
- Viles, H.A., 2005, Microclimate and weathering in the central Namib Desert, Namibia. *Geomorphology*, 67, 189-209.
- Walder, J. and Hallet, B., 1985, A theoretical model of the fracture of rock during freezing. *Geological Society of American Bulletin*, 96, 336-346.
- Warscheid, T. and Braams, J., 2000, Biodeterioration of stone : a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 343-368.
- World Heritage Center, 2016, State of conservation of Timbuktu (Mali). <http://whc.unesco.org/>