법주사와 선암사의 국지 기상 및 미세먼지 특성 비교

김명남¹ | 임보아 | 이명성* | 정소영

국립문화재연구소 복원기술연구실, *국립문화재연구소 보존과학연구실

Comparison of Characteristics of Local Meteorological and Particulate Matter(TSP) on the Beopjusa Temple and Seonamsa Temple

Myoung Nam Kim¹ | Bo A Lim | Myeong Seong Lee* | So Young Jeong

Restoration Technology Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

*Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

¹Corresponding Author: compassion4@korea.kr, +82-42-860-9345

초록 건조물문화재의 생물피해 관련하여 먼지 기상요소를 직접 측정하고 국지 기상 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구는 목조 건축물, 석조 건축물 생물피해가 확인되고, 지역적 기후 차이가 뚜렷한 충북 보은 법주사와 전남 순천 선암사를 비교 대상으로 기상요소 10가지 항목을 관측하였고 미세먼지(TSP)를 포집 분석하였다. 또한, 기상요소-미세먼지 간, 기상요소 간 상관성 분석을 실시하였다. 법주사의 국지 기상 특성은 일사량, 자외선량, 증발량이 많고 풍속이 빠르며 미세먼지 농도가 높은 반면 선암사의 국지 기상 특성은 기온, 습도, 이슬점온도, 기압이 높고 강수량, 강수일수가 많았다. 미세먼지의 원소분석결과, 선암사는 해염 입자가 추가로 발견되었고, 법주사에 비해 생체 입자와 철함유 입자의 월별 빈도가 높게 나타났다. 상관성 분석 결과, 법주사는 풍속이, 선암사는 습도가 주요 기상인자로써 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이상의 결과로 선암사의 기상 특성은 각종 생물 성장에 유리하므로 건조물문화재의 생물학적 손상에 영향이 더 클 것으로 예상된다.

중심어: 건조물문화재, 생물피해, 국지 기상 특성, 미세먼지, 상관성 분석

ABSTRACT It is crucial to measure meteorological elements in relation to the biodeterioration of building cultural heritages. The Beopjusa and Seonamsa temples located respectively in Chungbuk and Jeonnam provinces, Korea, exhibit biological damage to the building cultural heritages and cause noticeable climatic differences. To compare biodeterioration environments of the abovementioned temples, 10 meteorological elements were observed, and particulate matter (TSP) was collected at each location. Furthermore, a correlation analysis was conducted between meteorological elements, and between meteorological elements and TSP. The local meteorology at Beopjusa temple characteristically showcased high total horizontal radiation, UV radiation, evaporation, wind speed, and TSP concentration, whereas, that at Seonamsa temple showcased high temperature, humidity, dew point temperature, air pressure, precipitation and number of days with precipitation. An elemental analysis of TSP revealed the presence of sea-salts at Seonamsa temple, and compared to that of Beopjusa temple, the monthly frequencies of biogenic aerosol and Fe-containing particles were higher. The correlation analysis showed that wind speed and humidity were major meteorological factors at Beopjusa and Seonamsa temples,

respectively. Subsequently, the characteristics of the local meteorology at Seonamsa temple are expected to affect the biological damage of the building cultural heritages, which is favorable for the growth of various organisms.

Key Words: Building cultural heritages, Biodeterioration, Characteristics of local meteorology, Particulate matter(TSP), Correlation analysis

1. 서 론

건조물문화재는 오랜 세월의 경과에 따른 풍화와 부식은 물론 기후변화, 이상기후로 인해 훼손이 가속화되고 있으며, 이러한 보존환경의 전반적 악화로 인해 보수정비 주기가 갈수록 짧아지고 있는 추세이다. 건조물문화재에 있어서 생물학적 훼손이 발생했다는 것은 물리적, 화학적 풍화가 어느 정도 진행되었다는 것을 의미하며 생물피해 발생과 동시에 건조물문화재의 재질을 변질시켜 본래 모습을 잃기 쉽고 원형을 상실할 우려가 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2015).

우리나라에서 문화재로 지정된 건축문화재는 목조문화재의 경우 국보 24점, 보물 156점이며, 석조문화재의 경우 국보 71점, 보물 501점이다. 목조문화재의 생물피해는 흰개미, 벌류, 빗살수염벌레, 넓적나무좀 등에 의한 곤충 피해와 표면오염균, 백색부후균, 연부후균, 갈색부후균, 기타 균 등에 의한 미생물 피해이며(National Research Institute of Cultural Heritage, 2015; National Research Institute of Cultural Heritage, 2016), 석조문화재의 생물피해는 수목, 초본식물, 지의류, 이끼류, 조류, 진균류, 세균 등에 의해 발생한다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011; National Research Institute of Cultural Heritage, 2014).

일반적으로 한반도는 한대 대륙기단과 열대 해양기단과의 접촉대인 태평양 한대 전선대가 이동하는 중위도 아시아 대륙의 동안에 위치하여 동안기후와 계절풍 기후의 특색을 함께 지닌다(Park and Moon, 1998). 그리고 한반도의 대기 흐름은 태백, 소백 산맥 등의 산악효과로 산악지형에서는 짧은 거리에서도 지역차가 커 기후요소의 값이 크게 변화하며, 반도의 속성인 바다와 육지의 열용량 차이에 의한 영향도 크게 받아 특히 해안지역에서는 국지기상은 종관규모 일기계와 지역적 특성이 결합되어 복잡하게 나타난다. 한반도의 기후환경은 수리 및 지리적 특성에 매우 복잡하게 영향을 받아 형성된다(Kim and Jhun, 1992). 특히, 우리나라는 전세계의 평균적인 온난화 속도보다 훨씬 빠르게 진행되고 있으며 지역별로 도시화나 산업화 정도,

지형적 위치에 따라 그 속도가 다르게 나타나고 있을 뿐 아니라 계절별, 기상요소별로 변화 경향도 차이를 보이고 있다. 연평균기온 상승률은 대도시, 남해안, 겨울철이 높았으며, 반대로 전원 지역, 동해안, 여름철이 낮았다(Kim, 2009). 이러한 경향은 겨울철 한파와 대설이 크게 줄고 강풍과 풍랑이 그 자리를 차지하는 양상으로 나타났으며(Herald Corporation, 2017), 여름철 태풍의 평균 발생 수는 감소하고 태풍의 최대풍속은 강해지는 추세를 보인다(Seol, 2010).

기상, 기후 관점에서 건조물문화재를 가해하는 생물, 미생물의 발생과 활성 그리고 생존력 등에 관한 연구사례를 살펴보면, 기상요소들이 미생물 활성 변화에 35.7% 기여하고 있으며, 대기온도는 양의 관계, 풍속은 음의 관계임을 밝혔다(Zhong *et al.*, 2016). 안개 발생과 높은 습도는 흰개미 생존율이 증가하고, 미생물 균주의 생장속도가 빨라지며, 미생물 활성 증가에 영향을 주는 것으로 나타났다(Korea National University of Cultural Heritage Industry-Academic Cooperation Foundation, 2014; Zhong *et al.*, 2016). 풍속은 미세먼지내 총 미생물부하량과 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다(Mansour *et al.*, 2014). 또한, 온도, 상대습도는 부유곰팡이 종류에 따라 생존력에 있어 양 또는 음의 상관성을 가지는 것으로 조사되었으며, 대기오염물질은 상관성이 나타나지 않았다(Abdel Hameed *et al.*, 2012). 이상의 연구결과들은 기상요소가 생물과 미생물의 발생, 성장, 활성, 생존력에 밀접한 영향을 주고 있으며, 그 상관성을 밝히고자 하였다. 그러나, 온도, 습도, 풍속 등 몇 가지 기상요소에 한정하여 측정과 상관성 분석을 진행한 점에서 다양한 기상요소에 기반한 국지 기상 특성을 충분히 반영하였다고 보기엔 어렵다. 또한, 일부 연구에서는 인접 기상청 자료를 그대로 차용함으로써 해석의 오류 가능성도 존재한다. 왜냐하면, 기온, 기압을 제외하면, 습도, 풍속, 풍향 등은 관측 지점에 따른 변화가 존재하기 때문이다(Meteorological Research Institute Korea Meteorological Administration, 2006). 따라서, 대부분 산악지형에 자리잡은 사찰 내 건조물문화재의 기상 모니터링에 있어 다수의 기상요소들에 대한 직접 측정이 불가피하다. 아울러 국

지기상 특성을 충분히 이해하고 그 속에서의 생물과 미생물의 거동을 이해하는 것이 중요하다.

그러므로, 본 연구는 목조 건축물과 석조 건축물의 생물 피해가 확인되고, 지역적 기후 차이가 뚜렷한 충북 보은 법주사와 전남 순천 선암사를 비교 대상으로 선정하였다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2015). 자동 기상 측정기를 각각 설치하여 기상요소의 관측값을 수집하였으며, 미세먼지를 포집하여 질량농도, 이온 성분, 구성 성분을 분석하였다. 또한, 기상요소-미세먼지 간, 기상요소 간 상관성 분석을 실시하였다. 이상의 결과들을 통해 법주사와 선암사의 국지 기상 특성과 미세먼지 특성을 비교하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 관측지점

법주사는 충청북도 보은군 속리산면 법주사로 405에 위치하고, 경내 건조물문화재는 금강문을 시작으로 북북동 방향으로 배치되어 있으며, 남남서 방향을 바라보고 있다. 기상요소 측정지점은 총지선원 마당(북위 $36^{\circ} 32' 36.40''$,

동경 $127^{\circ} 50' 03.25''$, 해발높이 352 m)이며, 미세먼지 측정지점은 희견보살상 주변($N36^{\circ}32'33.64''$, $E127^{\circ}49'58.06''$, 해발높이 351 m)과 석련지 주변($N36^{\circ}32'29.58''$, $E127^{\circ}49'56.47''$, 해발높이 349 m) 등 2곳이다(Figure 1A, 1C, 1D, 1E). 선암사는 전라남도 순천시 승주읍 선암사길 450에 위치하고, 경내 건조물문화재는 일주문을 시작으로 북북서 방향으로 배치되어 있으며, 남남동 방향을 바라보고 있다. 기상요소 측정지점은 산신각 북편 70 m 지점(북위 $34^{\circ} 59' 51.90''$, 동경 $127^{\circ} 19' 47.68''$, 해발높이 265 m)이며, 미세먼지 측정지점은 대각암승탑 주변($N34^{\circ}59'46.82''$, $E127^{\circ}19'37.47''$, 해발높이 308 m)과 동서삼층석탑 주변($N34^{\circ}59'47.53''$, $E127^{\circ}19'52.54''$, 해발높이 255 m) 등 2곳이다(Figure 1B, 1F, 1G, 1H).

2.2. 기상요소

기상요소 10개 항목(기온, 습도, 이슬점온도, 풍속, 풍향, 해면기압, 강수량, 일사량, 자외선량, 증발량)에 대하여 자동 기상측정기(Vantage Pro2 Plus, Davis Instrument,

Figure 1. Meteorological elements & particulate matter monitoring site. (A) Beopjusa temple, (B) Seonamsa temple, (C) Weather station(Beopjusa), (D) PM sampler 1(Beopjusa), (E) PM sampler 2(Beopjusa), (F) Weather station(Seonamsa), (G) PM sampler 1(Seonamsa), (H) PM sampler 2(Seonamsa).

Table 1. Monitoring elements

Items	Elements	Unit	Equipments
Meteorological element	Air temperature	℃	Vantage Pro2 Plus (Davis Instrument, USA)
	Relative humidity	%	
	Dew point temperature	℃	
	Wind speed	m/s	
	Wind direction	°	
	Sea level pressure	hPa	
	Precipitation	mm	
	Total horizontal radiation	MJ/m ²	
	UV index	-	
Environment factor	Evaporation	mm	Minivol.TAS (Air Metrics, USA)
	Particulate matter(TSP)	μg/m ³	

Table 2. Pearson correlation coefficient. Left: Equation, Right: Pearson correlation interpretation

$r = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2 \times \Sigma(y - \bar{y})^2}}$	Pearson correlation interpretation	
	p-Value < 0.05	
	p-Value < 0.01	
	-1.0 ~ -0.7	A strong negative linear relationship
	0.7 ~ 1.0	A strong positive linear relationship

USA)를 설치하여 2015년 6월부터 2016년 5월까지 1시간 단위 관측값을 수집하였다(Table 1). 풍향은 바람장미 프로그램(WRPlot View, Lakes Environmental, USA)을 이용하였다. 자외선량은 자외선 지수로 관측되며, 자외선 지수는 미국환경청(EPA)기준으로 0-2(낮음), 3-5(보통), 6-7(높음), 8-10(매우 높음), 11+(극히 높음)으로 분류된다.

2.3. 미세먼지

미세먼지(Total Suspended Particles; TSP)는 공극 2.0 μm의 테프론(Polytetrafluoroethylene; PTFE)여과지(Zeflour P5PJ047, Pall corporation, USA)와 미세먼지포집기(MiniVol.TAS, Air Metrics, USA)를 이용하여 2015년 6월부터 2016년 5월까지 공기유량 5 L/min로 월 1회 24시간 포집을 진행하였다. 2015년 11월, 12월, 2016년 1월, 2월은 미세먼지를 포집하지 못했다. 포집된 미세먼지에 대하여 질량농도 분석(중량법), 이온 분석(ICS-3000, Dionex, USA), FE-SEM분석(Merlin, Zeiss, Germany)을 실시하였다. 질량농도 분석은 포집된 여과지를 온도 23℃, 상대습도 50%에서 항량이 될 때까지 보관하였다가 0.01 mg의

감도를 갖는 분석용 저울로 0.1 mg까지 정확히 단후 포집 전·후의 여과지의 질량차이와 흡인 공기량으로부터 먼지 농도를 구하였다. 이온 분석은 포집된 여과지를 탈이온수(≥ 18.3 MΩ) 20 ml를 사용하여 2시간 진탕추출 하였으며, 추출액은 다시 공극(pore size) 1 μm인 직경 110 mm의 필터(Toyo 5C)와 0.45 μm 멤브레인 필터로 거른 뒤 이온 크로마토그래피를 이용하여 분석하였다. 입자 분석은 FE-SEM EDS를 이용하여 작동거리 8.1 mm, 가속전압 10 kV, 점분해능 0.8 nm, 배율 ×100~×10000, 프로브전류 1.4 nA 조건으로 법주사 9개 시료 76개 입자, 선암사 9개 시료 142개 입자에 대하여 분석하였다(Ro *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2009; National Institute of Environmental Research, 2008; 2009; 2016; 2017)(Table 1).

2.4. 상관성분석

법주사 및 선암사의 건조물문화재 주변 기상요소와 미세먼지 관측값에 대하여 기상요소와 미세먼지 간, 기상요소 간 상관성을 분석하고 비교하였다. 2015년 6월부터 2016년 5월까지 월 1회 포집 미세먼지 질량농도와 포집 시

Figure 2. Meteorological elements on 2015-2016. (A) Air temperature, (B) Relative humidity, (C) Dewpoint temperature, (D) Wind speed, (E) Air pressure, (F) Precipitation, (G) Number of days with precipitation, (H) Total horizontal radiation, (I) UV index, (J) Evaporation, (K) Wind rose_Beopjusa temple, (L) Wind rose_Seonamsa temple(continuously).

Figure 2. Meteorological elements on 2015-2016. (A) Air temperature, (B) Relative humidity, (C) Dewpoint temperature, (D) Wind speed, (E) Air pressure, (F) Precipitation, (G) Number of days with precipitation, (H) Total horizontal radiation, (I) UV index, (J) Evaporation, (K) Wind rose_Beopjusa temple, (L) Wind rose_Seonamsa temple.

간대(24 h)의 기상요소 관측값을 정리하여 피어슨 상관분석(IBM SPSS Statistics 24, IBM, USA)을 실시하였다 (Table 2). 단, 자외선 지수는 자외선량(MJ/m^2)으로 변환 후 대입하였다.

3. 결 과

3.1. 법주사와 선암사의 기상요소

3.1.1. 기온

연평균 기온은 법주사 11.4℃, 선암사 12.8℃로 선암사가 1.4℃ 높았다. 법주사의 월평균 기온은 2015년 8월에 23.4℃로 가장 높았고 2016년 1월에 -3.4℃로 가장 낮았으며, 선암사의 월평균 기온은 2015년 8월에 23.4℃로 가장 높았고 2016년 1월에 -0.2℃로 가장 낮았다. 법주사의 월평균 기온의 고저 폭이 선암사보다 더 큰 것으로 나타났다. 계절별 평균 기온은 봄, 가을, 겨울은 선암사가 법주사보다 높았으며, 여름의 경우, 법주사가 선암사보다 평균 기온이 같거나 높았다(Figure 2A).

3.1.2. 습도

연평균 습도는 법주사 76.5%, 선암사 78.5%로 선암사가 2% 높았다. 법주사의 월평균 습도는 2015년 11월에 86.9%로 가장 높았고 2016년 3월에 66.8%로 가장 낮았으며, 선암사의 월평균 습도는 2015년 7월에 90.1%로 가장 높았고, 2016년 3월에 65.7%로 가장 낮았다. 계절별 평균

습도는 봄, 여름, 가을은 선암사가 법주사보다 높았으며, 겨울의 경우, 법주사가 선암사보다 평균 습도가 높았다 (Figure 2B).

3.1.3. 이슬점온도

연평균 이슬점온도는 법주사 6.7℃, 선암사 8.7℃로 선암사가 2.0℃ 높았다. 법주사의 월평균 이슬점온도는 2015년 8월에 20.2℃로 가장 높았고 2016년 1월에 -7.6℃로 가장 낮았으며, 선암사의 월평균 이슬점온도는 2015년 7월에 21.0℃로 가장 높았고, 2016년 1월에 -4.8℃로 가장 낮았다. 계절별 평균 이슬점온도는 봄, 여름, 가을, 겨울 모두 선암사가 법주사보다 높았다(Figure 2C).

3.1.4. 풍속

연평균 풍속은 법주사 0.5 m/s, 선암사 0.4 m/s로 법주사가 0.1 m/s 빨랐다. 법주사의 월평균 풍속은 2015년 11월에 0.7 m/s로 가장 빨랐고 2015년 8월에 0.3 m/s로 가장 느렸으며, 선암사의 월평균 풍속은 2016년 2월에 0.8 m/s로 가장 빨랐고, 2015년 8월에 0.2 m/s로 가장 느렸다. 계절별 평균 풍속은 봄, 여름, 가을은 법주사가 선암사보다 빨랐으며, 겨울의 경우, 선암사가 법주사보다 평균 풍속이 빨랐다(Figure 2D).

3.1.5. 주풍향

연 주풍향은 법주사가 ESE, 선암사가 SE로 나타났다. 법주사의 월 주풍향은 2015년 6월 W, 7월 W, 8월 W, 9월

W, 10월 ESE, 11월 WSW, 12월 ESE, 2016년 1월 ESE, 2월 ESE, 3월 ESE, 4월 WSW, 5월 ESE, 선암사의 월 주풍향은 2015년 6월 SE, 7월 SE, 8월 S, 9월 S, 10월 S, 11월 SE, 12월 SE, 2016년 1월 ESE, 2월 SE, 3월 WNW, 4월 SE, 5월 SE 로 나타났다. 계절별 주풍향은 법주사의 경우, 여름 W, 가을 W, 겨울 ESE, 봄 ESE, 선암사의 경우, 여름 SE, 가을 S, 겨울 SE, 봄 SE로 선암사는 연중 SE와 S가 일정하였다(Figure 2K, 2L).

3.1.6. 기압

연평균 해면기압은 법주사 1015.6 hPa, 선암사 1016.2 hPa로 선암사가 0.6 hPa로 높게 나타났다. 법주사의 월평균 해면기압은 2015년 12월에 1024.0 hPa로 가장 높았고 2015년 6월에 1005.9 hPa로 가장 낮았으며, 선암사의 월평균 해면기압은 2015년 12월에 1024.3 hPa로 가장 높았고, 2015년 6월에 1007.0 hPa로 가장 낮았다. 계절별 평균 해면기압은 봄, 여름, 가을, 겨울 모두 선암사가 법주사보다 높았으며, 봄, 여름의 경우 그 차이가 컸다. 해면기압은 해발높이와 반비례하는데 법주사의 해발 높이는 352 m, 선암사의 해발 높이는 265 m이다(Figure 2E).

3.1.7. 강수량

연 강수량은 법주사 881.4 mm, 선암사 1592.0 mm로 선암사가 710.6 mm 많았다. 법주사의 월 강수량은 2015년 7월에 147.6 mm로 가장 많았고, 2016년 1월에 5.8 mm로 가장 적었으며, 선암사의 월 강수량 2015년 7월에 340.0 mm로 가장 많았고, 2016년 1월에 36.2 mm로 가장 적었다. 계절별 강수량은 봄, 여름, 가을, 겨울 모두 선암사가 법주사보다 많았다(Figure 2F).

3.1.8. 강수일수

연 강수일수는 법주사 132일, 선암사 143일로 선암사가

11일 많았다. 법주사의 월 강수일수는 2015년 11월에 19일로 가장 많았고, 2016년 3월에 6일로 가장 적었으며, 선암사의 월 강수일수는 2015년 12월에 17일, 2015년 10월에 6일로 가장 적었다. 계절별 강수일수는 봄, 여름, 가을, 겨울 모두 선암사가 법주사보다 많았다(Figure 2G).

3.1.9. 일사량

연 일사량은 법주사 4365.8 MJ/m², 선암사 4273.1 MJ/m²로 법주사가 92.7 MJ/m² 많았다. 법주사의 월 일사량은 2016년 5월에 616.4 MJ/m²로 가장 많았고, 2015년 11월에 137.3 MJ/m²로 가장 적었으며, 선암사의 월 일사량은 2016년 5월에 526.6 MJ/m²로 가장 많았고, 2015년 11월에 170.8 MJ/m²로 가장 적었다. 계절별 일사량은 봄, 여름은 법주사가 선암사보다 많았으며, 가을, 겨울은 선암사가 법주사보다 많았다(Figure 2H).

3.1.10. 자외선지수

자외선 지수 연 최고는 법주사 2015년 7월 10.6, 선암사 2015년 7월 9.8로 나타났다. 자외선 지수 6.0이상(높음) 발생일이 법주사 81일, 선암사 57일로 나타났으며, 8.0 이상(매우 높음) 발생일이 법주사 14일, 선암사 5일로 나타나 전체적으로 법주사가 강한 자외선노출이 많았다. 법주사는 6.0 이상(높음) 발생일이 2015년 7월에 18일로 가장 많았고, 2015년 10월부터 2016년 3월까지의 6.0 이상(높음) 발생일이 없었다. 선암사는 6.0 이상(높음) 발생일이 2015년 8월에 11일로 가장 많았고, 2015년 10월부터 2016년 3월까지의 6.0 이상(높음) 발생일이 없었다. 계절별 자외선 지수는 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 높았으며, 법주사가 선암사보다 높았다(Figure 2I).

3.1.11. 증발량

연 증발량은 법주사 777.1 mm, 선암사 748.6 mm로 법

Table 3. Mass concentration of particulate matter(TSP) in Beopjusa temple and Seonamsa temple

Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Items	2015						2016						Annual (Mean)
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
	Summer			Fall			Winter			Spring			
BJ (2015-2016)	42	20	8	29	75	-	-	-	-	78	13	18	35
SA (2015-2016)	19	29	20	8	26	-	-	-	-	40	44	41	27

Table 4. Mean concentration of mass and chemical ionic component in particulate matter(TSP) of Beopjusa temple
Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Site	Month	Mass	Anion	Cation	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
BJ	2015	6	42	24.24	8.84	1.23	3.74	19.27	3.68	3.61	0.76	0.67
		7	19	12.17	4.13	1.11	2.07	8.99	2.34	1.08	0.28	0.38
		8	5	5.82	2.52	1.46	2.48	1.88	2.19	0.24	0.09	0.00
		9	32	6.24	2.33	2.42	2.20	1.62	2.33	0.00	0.01	0.00
		10	79	18.56	8.37	0.00	10.82	7.74	2.22	5.11	1.03	0.00
	2016	3	73	18.24	9.64	0.29	11.60	6.35	2.62	5.00	1.08	0.23
		4	13	0.73	0.08	0.03	0.40	0.30	0.00	0.02	0.00	0.05
		5	18	0.27	0.12	0.02	0.21	0.05	0.07	0.03	0.01	0.00
	Mean	35.13	10.78	4.50	0.82	4.19	5.78	1.93	1.89	0.41	0.05	0.23

Table 5. Mean concentration of mass and chemical ionic component in particulate matter(TSP) of Seonamsa temple
Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Site	Month	Mass	Anion	Cation	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
SA	2015	6	20	10.16	4.87	1.34	2.86	5.96	3.82	0.75	0.30	0.00
		7	28	13.61	5.81	1.70	1.90	10.01	3.80	1.39	0.39	0.19
		8	19	11.82	4.02	1.21	2.33	8.28	2.57	0.97	0.27	0.03
		9	8	6.36	1.81	1.62	1.98	2.77	1.60	0.16	0.05	0.00
		10	24	0.84	0.30	0.00	0.14	0.70	0.14	0.13	0.03	0.00
	2016	3	40	6.35	3.10	0.00	2.97	3.37	1.53	1.09	0.30	0.12
		4	48	2.28	0.77	0.68	1.10	0.50	0.60	0.12	0.04	0.00
		5	41	1.71	0.34	0.05	0.69	0.98	0.20	0.10	0.03	0.00
	Mean	28.50	6.64	2.63	0.82	1.75	4.07	1.78	0.59	0.18	0.02	0.05

주사가 28.5 mm 많았다. 법주사의 월 증발량은 2016년 5월에 118.5 mm로 가장 많았고, 2015년 12월에 22.7 mm로 가장 적었으며, 선암사의 월 증발량은 2016년 5월에 98.2 mm로 가장 많았고, 2015년 11월에 27.3 mm로 가장 적었다. 계절별 증발량은 봄, 여름은 법주사가 많았으며, 가을, 겨울은 선암사가 법주사보다 많았다(Figure 2J).

3.2. 법주사와 선암사의 미세먼지

3.2.1. 질량농도분석(중량법)

미세먼지 질량농도는 법주사 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 선암사 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 법주사가 선암사보다 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았다. 법주사의 미세먼지 질량농도는 2016년 3월에 $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 2015년 8월에 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았으며, 선암사의 미세먼지 질량농도는 2016년 4월에 $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았

고, 2015년 9월에 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다(Table 3).

3.2.2. 이온분석

미세먼지에 대한 이온 성분 분석 결과, 법주사는 평균 음이온 농도 $10.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 양이온 농도 $4.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 평균 음이온의 구성은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 순으로 높았고, 평균 양이온의 구성은 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 높게 조사되었다. 선암사는 평균 음이온 농도 $6.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 양이온 농도 $2.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 평균 음이온의 구성은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 순으로 높았고, 평균 양이온의 구성은 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 높게 조사되었다. 다만, 법주사의 여름, 가을의 경우, 음이온의 구성은 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 순으로, 양이온의 구성은 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 변화가 있었다(Table 4, 5).

3.2.3. FE-SEM분석

미세먼지에 대한 전자현미경 원소분석 결과(FE-SEM-EDS), 법주사의 경우, 연중 규산알루미늄 입자, 칼슘함유 입자, 탄소질 토양입자가 발견되는 가운데 2015년 6월, 7월, 2016년 3월, 4월, 5월에 생체 입자(화분, 포자, 조류, 식물 등)가 조사되었으며, 2015년 6월, 8월에 철함유 입자가 확인되었다. 선암사의 경우, 연중 규산알루미늄 입자, 칼슘함유 입자, 탄소질 토양입자가 발견되는 가운데 2015년 6월, 8월, 9월, 10월, 2016년 3월, 4월, 5월에 생체 입자가 확인되었으며 2015년 6월, 9월, 10월, 2016년 5월에 철함유 입자가 조사되었고 2015년 6월, 10월, 2016년 2월에 해염 입자가 확인되었다. 법주사의 미세먼지 구성은 규산알루미늄 입자, 탄소질 토양입자, 생체 입자, 칼슘함유 입자, 철함

유 입자 순으로, 선암사의 미세먼지 구성은 규산알루미늄 입자, 생체 입자, 탄소질 토양입자, 철함유 입자, 해염 입자, 칼슘함유 입자 순으로 많았다(Figure 3, Table 6).

3.3. 법주사와 선암사의 통계분석

3.3.1. 상관성 분석

법주사의 기상요소와 미세먼지 간 상관성 분석 결과, 법주사의 미세먼지는 기압 0.835($p<0.05$), 습도 -0.791($p<0.05$)과 높은 상관성을 보였다. 기상요소 간 상관성 분석결과, 법주사의 경우 풍속-일사량 -0.816($p<0.05$), 풍속-자외선량 -0.789($p<0.05$), 풍속-증발량 -0.778($p<0.05$) 간 높은 상관을 보였다. 선암사의 기상요소와 미세먼지 간 상관성

Figure 3. Elemental analysis and particle classification for particulate matter(Unit : %mass).

Table 6. Monthly particulate matter(TSP) types and particle count in Beopjusa temple and Seonamsa temple

Items	2015					2016				
	6	7	8	9	10	2	3	4	5	
BJ (76)	Common particle	- Aluminio- silicate(3)	- Aluminio- silicate(4) - Carbon- aceous(3)	- Aluminio- silicate(2) - Carbon- aceous(1) - CaCO ₃ - Containing(1)	- Aluminio- silicate(12) - Carbon- aceous(1)	- Aluminio- silicate(5)	- Aluminio- silicate(8) - CaCO ₃ - Containing(1)	- Aluminio- silicate(9) - Carbon- aceous(4) - CaCO ₃ - Containing(2)	- Aluminio- silicate(2)	- Aluminio- silicate(3) - Carbon- aceous(1) - CaCO ₃ - Containing(2)
	Characteristic particle	- Biogenic Aerosol(1) - Fe- Containing(1)	- Biogenic Aerosol(2)	- Fe- Containing(1)	-	-	-	- Biogenic Aerosol(1)	- Biogenic Aerosol(2)	- Biogenic Aerosol(4)
SA (142)	Common particle	- Aluminio- silicate(3) - Carbon- aceous(1)	- Aluminio- silicate(13) - Carbon- aceous(1)	- Aluminio- silicate(7)	- Aluminio- silicate(10) - Carbon- aceous(1)	- Aluminio- silicate(14) - Carbon- aceous(1)	- Aluminio- silicate(5) - Carbon- aceous(3) - CaCO ₃ - Containing(1)	- Aluminio- silicate(5) - Carbon- aceous(13)	- Aluminio- silicate(7) - Carbon- aceous(1)	- Aluminio- silicate(11) - Carbon- aceous(3) - CaCO ₃ - Containing(3)
	Characteristic particle	- Biogenic Aerosol(5) - Fe- Containing(1) - Sea-salts(1)	-	- Biogenic Aerosol(1)	- Biogenic Aerosol(1) - Fe- Containing(2)	- Biogenic Aerosol(1) - Fe- Containing(1) - Sea-salts(1)	- Sea-salts(2)	- Biogenic Aerosol(6)	- Biogenic Aerosol(4)	- Biogenic Aerosol(11) - Fe- Containing(2)

분석 결과, 선암사의 미세먼지는 기상요소와의 상관성이 나타나지 않았다. 기상요소 간 상관성 분석결과, 선암사의 경우 습도-풍속 -0.942($p<0.01$), 습도-일사량 -0.825($p<0.05$), 습도-이슬점온도 0.812($p<0.05$), 그리고 자외선량-풍향 -0.879($p<0.05$) 간 높은 상관성 있는 것으로 조사되었다. 또한, 법주사, 선암사 모두에서 온도-이슬점온도 간, 일사량-자외선량-증발량 간 상관관계는 공통적으로 높게 나타났다(Table 7, 8).

4. 고 찰

4.1. 법주사와 선암사의 기상요소

법주사와 선암사의 기상은 법주사는 맑고 바람이 많으며, 선암사는 덥고 비가 많다. 이런 기상 특성은 법주사는 일사량, 자외선량, 증발량이 많고 풍속이 빠르며 미세먼지 농도가 높은 특징을 가지는 반면, 선암사는 기온, 습도, 이슬점온도, 기압이 높고 강수량, 강수일수가 많은 특징으로 나타났다. 계절적 기상 특성을 살펴볼 때, 법주사는 선암사에 비해 여름 평균 기온이 높고 겨울 평균 기온이 낮아 기온의 고저 폭이 더 컸으며, 겨울의 평균 습도가 높았다. 선암사는 법주사에 비해 겨울 평균 풍속이 높았으며, 가을과 겨울에 일사량과 증발량이 높았다. 이러한 기상 특성을 건조물문화재의 피해와 함께 고려할 때, 법주사의 기상 특성은 건조물문화재의 동결 융해, 수축 이완 등을 통한 물리적 손상에 더 영향을 미칠 것으로 판단되며, 선암사의 기상 특

성은 건조물문화재의 생물발생 등 생물학적 손상에 더 영향을 미칠 것으로 예상된다. 법주사, 선암사의 국지 기상 특성은 보은의 기후를 영남 내륙형으로, 순천의 기후를 남해안형으로 구분한 기후 지역 구분과 대체로 일치하였다(Park and Moon, 1998).

4.2. 법주사와 선암사의 미세먼지

법주사와 선암사의 평균 음이온의 구성은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 순으로, 평균 양이온의 구성은 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 동일하였으나 법주사의 여름과 가을에서 음이온의 구성은 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 순으로, 양이온의 구성은 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 변화가 있었다. 법주사의 여름(6~8월), 가을(9~11월) 주풍향이 W(서풍)인 점에서 청주, 세종, 대전 등 도시 공업지역 및 경부고속도로의 영향으로 판단된다. 미세먼지에 대한 전자현미경 원소분석 결과(FE-SEM-EDS), 법주사의 경우, 2015년 6월과 8월에 철함유 입자가 발견되었는데, 청주산업단지(서북서 36 km) 또는 당진제철소(북서 113 km)로부터 기인하는 것으로 추정되었다. 선암사는 법주사에 비해 미세먼지 농도는 낮으나 생체 입자, 철함유 입자, 해염 입자의 월별 빈도가 높은 것으로 나타났다. 생체 입자는 선암사 주변의 식생으로부터, 철함유 입자는 광양제철소 및 산업단지(동남동 40 km)로부터, 해염 입자는 순천만(남남동 22 km)으로부터 기인하는 것으로 추정되었다. 이는 선암사의 연 주풍향이 남동풍(SE)인 점에서 유의미한 것으로 판단되었다.

Table 7. Correlation analysis between meteorological elements and the particulate matter(TSP) in Beopjusa temple

Beopjusa	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Relative humidity (%)	DewPt. ($^{\circ}\text{C}$)	Wind speed (m/s)	Barometer (hPa)	Rain (mm)	Solar radiation (MJ/m^2)	ET (mm)	UV (MJ/m^2)	Wind direction
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	-0.652	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Relative humidity (%)	-0.791*	0.583	1	-	-	-	-	-	-	-	-
DewPt. ($^{\circ}\text{C}$)	-0.742	0.977**	0.742	1	-	-	-	-	-	-	-
Wind speed (m/s)	0.191	-0.378	0.231	-0.246	1	-	-	-	-	-	-
Barometer (hPa)	0.835*	-0.611	-0.590	-0.660	0.043	1	-	-	-	-	-
Rain (mm)	-0.584	0.331	0.645	0.438	-0.042	-0.493	1	-	-	-	-
Solar radiation (MJ/m^2)	0.048	0.311	-0.375	0.155	-0.816*	0.129	-0.476	1	-	-	-
ET (mm)	0.025	0.418	-0.293	0.266	-0.778*	0.107	-0.464	0.987**	1	-	-
UV (MJ/m^2)	-0.245	0.614	-0.055	0.490	-0.789*	-0.124	-0.294	0.933**	0.961**	1	-
Wind direction	0.179	-0.243	0.146	-0.164	0.187	0.310	-0.169	0.086	0.085	0.003	1

*Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

**Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

Table 8. Correlation analysis between meteorological elements and the particulate matter(TSP) in Seonamsa temple

Seonamsa	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Relative humidity (%)	DewPt. ($^{\circ}\text{C}$)	Wind speed (m/s)	Barometer (hPa)	Rain (mm)	Solar radiation (MJ/m^2)	ET (mm)	UV (MJ/m^2)	Wind direction
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	-0.654	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Relative humidity (%)	-0.741	0.665	1	-	-	-	-	-	-	-	-
DewPt. ($^{\circ}\text{C}$)	-0.725	0.976**	0.812*	1	-	-	-	-	-	-	-
Wind speed (m/s)	0.755	-0.636	-0.942**	-0.775	1	-	-	-	-	-	-
Barometer (hPa)	0.245	-0.684	-0.347	-0.633	0.198	1	-	-	-	-	-
Rain (mm)	-0.652	0.083	0.726	0.274	-0.655	-0.003	1	-	-	-	-
Solar radiation (MJ/m^2)	0.735	-0.324	-0.825*	-0.495	0.788	-0.165	-0.807	1	-	-	-
ET (mm)	0.623	-0.189	-0.767	-0.373	0.725	-0.271	-0.805	0.987**	1	-	-
UV (MJ/m^2)	0.397	0.114	-0.553	-0.075	0.570	-0.560	-0.717	0.881*	0.939**	1	-
Wind direction	0.276	-0.130	0.313	-0.032	-0.421	0.572	0.612	-0.616	-0.759	-0.879*	1

*Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

**Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

선암사의 경우, 생체 입자의 월별 빈도가 법주사보다 높아 각종 생물 성장에 유리한 여건임을 확인할 수 있었다.

4.3. 법주사와 선암사의 기상요소 상관성분석

기상요소와 미세먼지 간 상관관계 분석 결과, 법주사의 미세먼지는 기압(0.835($p<0.05$))과 습도 (-0.791($p<0.05$))와 높은 상관성을 보였으며, 선암사의 미세먼지는 기상요소와의 상관성이 나타나지 않았다. 기상요소 간 상관성 분석 결과, 법주사의 경우 풍속-일사량, 풍속-자외선량, 풍속-증발량 간 높은 상관을, 선암사의 경우 습도-풍속, 습도-일사량, 습도-이슬점온도 간, 그리고 자외선량-풍향 간 높은 상관을 보이는 차이가 나타났다. 이를 통해 법주사는 풍속이 주요 기상인자로 작용하고 있으며, 선암사는 습도가 주요 기상인자로 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 그 원인으로 법주사가 평탄한 개활 지형에, 선암사는 경사진 계곡 지형에 위치한 차이로 판단된다. 추후 총부유미생물 농도 자료 축적과 건조물문화재 생물피해 정도 정량화를 통해 기상요소-총 부유미생물농도, 기상요소-건조물문화재 생물피해 정도간의 상관성 분석도 진행할 예정이다.

5. 결 론

1. 법주사의 국지 기상 특성은 일사량, 자외선량, 증발량이 많고 풍속이 빠르며 미세먼지 농도가 높은 특징을 가지는 반면, 선암사의 국지기상 특성은 기온, 습도, 이슬점온도, 기압이 높고 강수량, 강수일수가 많은 특징으로 나타났다. 법주사의 기상 특성은 건조물문화재의 물리적 손상에 더 영향을 미칠 것으로 판단되며, 선암사의 기상 특성은 건조물문화재의 생물학적 손상에 더 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2. 미세먼지(TSP)의 질량농도는 법주사가 선암사보다 높았다. 미세먼지의 이온 구성은 법주사와 선암사 모두 평균 음이온의 구성은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 순으로, 평균 양이온의 구성은 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 동일하였다. 미세먼지의 원소분석 결과, 법주사와 선암사 모두에서 규산알루미늄 입자, 칼슘함유 입자, 탄소질 토양입자가 연중 공통입자로 확인되었으나 선암사는 해염 입자가 추가로 발견되었고, 법주사에 비해 생체 입자, 철함유 입자의 월별 빈도가 높게 나타났다. 선암사의 생체 입자의 월별 빈도가 법주사보다 높은 점에서 각종 생물 성장에 유리한 여건임을 확인할 수 있었다.

3. 기상요소와 미세먼지 간 상관관계 분석 결과, 법주사의 미세먼지는 기압과 양의 상관관계를, 습도와 음의 상관관계를 보였으나 선암사의 미세먼지는 기상요소와의 상관성이 나타나지 않았다. 기상요소 간 상관성 분석 결과, 법주사의 경우 풍속-일사량, 풍속-자외선량, 풍속-증발량 간 높은 상관을, 선암사의 경우 습도-풍속, 습도-일사량, 습도-이슬점온도 간, 그리고 자외선량-풍향 간 높은 상관을 보이는 차이가 나타났다. 이를 통해 법주사는 풍속이 주요 기상인자로 작용하고 있으며, 선암사는 습도가 주요 기상인자로 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이는 법주사가 평탄한 개활 지형에, 선암사는 경사진 계곡 지형에 위치한 차이로 판단된다.

사 사

이 연구는 2015, 2016년도 문화재청 국립문화재연구소 문화유산 조사연구(R&D) 사업의 지원을 받아 이루어졌으며 행정적 및 재정적 지원에 깊이 감사한다.

REFERENCES

- Abdel Hameed, A.A., Khoder, M.I., Ibrahim, Y.H., Saeed, Y., Osman M.E. and Ghanem, S., 2012, Science of the Total Environment, 414, 696-700.
- Herald Corporation, 2017, Winter has changed on the Korean Peninsula : Heavy snow and cold wave decreased, and strong wind and high seas increased. <http://news.heraldcorp.com/> (June 7, 2017)
- Kang, S.J., Hwang, H.J., Kang, S.N., Park, Y.M., Kim, H.K. and Ro, C.H., 2009, Quantitative ED-EPMA combined with morphological information for the characterization of individual aerosol particles collected in Incheon, Korea. Atmospheric Environment, 43, 3445-3453.
- Kim, C.H. and Jhun J.G., 1992, Numerical simulations of the three-dimensional land and sea breezes under synoptic flows over South Korea. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 28(2), 165-181. (in Korean with English abstract)
- Kim, T.R., 2009, A study on the air temperature change and regional characteristics in South Korea. Journal of the Chosun Natural Science, 2(2), 131-167. (in Korean with English abstract)

- Korea National University of Cultural Heritage Industry-Academic Cooperation Foundation, 2014, Research on environmental effect to nearby cultural properties after construction of Yeosu-Bo. 1-244. (in Korean with English abstract)
- Mansour, A.A., Magdy, S., Maria, A.R., Mamdouh, K., Abdel, H.A. and Safaa, E., 2014, Microorganisms associated particulate matter: A preliminary study. Science of the Total Environment, 479-480, 109-116.
- Meteorological Research Institute Korea Meteorological Administration, 2006, Diagnosis of characteristics of local meteorology and development of techniques for the meteorological environmental impact assessment (I). 1-6, 200. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research, 2008, Monitoring plan of acid deposition. 1-15. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research, 2009, The study for a regional scale variation of acid deposition and its impact on the ecosystem (I). 13-117. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research, 2016, Sampling methods in ambient atmosphere. 1-38. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research, 2017, Determination of particulate matter(PM-10) in indoor by the gravimetric method. 52-67. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Cleaning and surface contaminant of stone cultural heritage. 7. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2014, Conservation management of stone cultural heritage using nondestructive technology. 13, 15. (in Korean)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2015, Reconstruction of investigation technology of biodeterioration on building cultural heritages. 1-277. (in Korean with English abstract)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2016, Analysis research of correlation with biodeterioration on building cultural heritages. 1-371. (in Korean with English abstract)
- Park, H.W. and Moon B.C., 1998, A classification of climatic region in Korea using GIS. Journal of the Korean Geographical Society, 33(1), 17-40. (in Korean with English abstract)
- Ro, C.U., Osan, J., Szaloki, I., Oh, K.Y., Kim, H.K. and Grieken, R.V., 2000, Determination of chemical species in individual aerosol particles using ultrathin window EPMA. Environmental Science & Technology, 34, 3023-3030.
- Seol, D.I., 2010, Global warming and trends of typhoon variation. Journal of Navigation and Port Research, 34(6), 453-458. (in Korean with English abstract)
- Zhong, X., Qi, J., Li, H., Dong, L. and Gao, D., 2016, Seasonal distribution of microbial activity in bioaerosols in the outdoor environment of the Qingdao coastal region. Atmospheric Environment, 140, 506-513.