24절기 야외 부유곰팡이 농도 조사 및 기상요소와의 상관성 분석

Survey of Airborne Fungi Levels in 24 Seasonal Divisions and Correlation Analysis with Meteorological Elements

김명남*, 홍진영, 이정민, 박지희
국립문화재연구소 복원기술연구실

Myoung Nam Kim*, Jin Young Hong, Jeong Min Lee, Ji Hee Park

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

Received October 23, 2019
Revised November 18, 2019
Accepted November 24, 2019

*Corresponding author
E-mail: compassion4@korea.kr,
+82-42-860-9345

Journal of Conservation Science
2019;35(6):652-663
<https://doi.org/10.12654/JCS.2019.35.6.08>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed
under the terms of the Creative
Commons Attribution Non-Commercial
License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits
unrestricted non-commercial use,
distribution, and reproduction in any
medium, provided the original work is
properly cited.

초 록 목조건축문화재의 생물피해 영향을 미치는 야외 부유곰팡이의 연중 변화와 일간 변화를 파악하기 위해서는 포집주기와 측정시간대의 충분한 반영이 필요하다. 본 연구는 2018년 8월부터 2019년 7월까지 1년간 국립문화재연구소 보존과학센터 옥상에서 에어샘플러와 Potato dextrose agar 배지를 이용하여 포집주기는 24절기, 포집시간대는 14시(낮)와 23시(밤)에 포집하였고, 기상요소를 1시간 단위로 수집하였으며, 부유곰팡이의 농도 조사 및 기상요소와의 상관성 분석을 진행하였다. 그 결과, 부유곰팡이 농도는 11월, 가을, 밤에 가장 높았고, 가을, 여름, 겨울, 봄 순으로 높았으며, 강우, 태풍, 황사/미세먼지에 따라 부유곰팡이 농도, 종류, 우점은 달랐다. 부유곰팡이 농도는 강수량, 강수일수, 상대습도와 강한 양의 선형 상관성이 나타났다. 부유곰팡이 농도는 영양원에 있어서는 죽은 식물체의 증가 시기, 기상요소에 있어서는 강우를 포함한 높은 상대습도 조건과 관련이 깊었다.

중심어 야외 부유곰팡이, 24절기, 기상요소, 상관성 분석, 강수량, 상대습도

ABSTRACT To identify daily and annual changes in outdoor airborne fungi, it is necessary to shorten the collection cycle and increase the number of measurements. In this study, measurements were performed by employing an air sampler and potato dextrose agar media on the rooftop of National Research Institute of Cultural Heritage during a period of one year (August 2018 to July 2019). The collection cycle spanned the twenty-four seasonal divisions and the collection time was 2 p.m. and 11 p.m.. Meteorological elements were collected at intervals of one hour. Furthermore, the concentration of airborne fungi was monitored and correlation analysis with meteorological elements was subsequently conducted. Obtained results indicate that the concentration of airborne fungi is found to be highest in November, autumn, night, followed by autumn, summer, winter, and spring. The concentration, type, and dominant species of airborne fungi can vary depending on factors such as rainfall, typhoons, and yellow dust (fine dust). The concentration of airborne fungi indicates a strong positive linear relationship between precipitation, number of precipitation days, and relative humidity. The concentration of airborne fungi was related to the period of increase of dead plants in terms of nutrition source, and to the high relative humidity conditions including rainfall in terms of meteorological elements.

Key Words Outdoor airborne fungi, 24 Seasonal divisions, Meteorological elements, Precipitation, Relative humidity, Correlation analysis

1. 서론

공기 중 부유폴팡이는 바이오 에어로졸의 상당 부분을 차지하며 대기 먼지 중 조대입자에 속한다(Sesartic and Dallafior, 2011). 이러한 부유폴팡이는 많은 유기물과 영양 성분이 있는 토양에 군집하고 있으며, 모든 토양에 같은 종류의 포팡이가 존재하지 않고 그 곳의 환경, 즉 온도나 습도를 비롯하여 식물의 종류 등에 따라서 포팡이의 종류가 다르다(Jeong, 2007). 포팡이는 능동적인 방출과 바람에 의한 수동적인 방출을 통해 토양에서 공기로 방출되어 생물권과 다양한 방식으로 상호작용하며, 건강, 농업 경제, 식량 생산, 문화 유산 등에 영향을 미친다. 또한, 그것은 얼음과 구름 응축 핵의 역할을 함으로써 대기 화학을 조절하고 기후를 조절하는데 잠재적인 역할까지 한다(Ariya et al., 2009; Frohlich-Nowoisky et al., 2009; Sesartic et al., 2013; Kim et al., 2017).

포팡이는 수많은 종류가 있고 그 종류에 따라 다양한 색깔과 특성을 가지고 있다. 호흡성포팡이로는 *Alternaria*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium* 등이고, 호진성포팡이로는 *Aspergillus*, *Eurotium*, *Wallemia* 등이다. 포팡이의 생리, 생태에 따른 분류는 토양 진균, 수생 진균, 부생 진균, 기생 진균, 공생 진균, 호염 진균, 호케라친 진균, 셀룰로소분해 진균 등이 있다. 집락 형태는 벨벳형, 면형, 분말형, 평탄형, 주름형, 고랑형으로 구분한다(Lee et al., 2014).

포팡이의 농도는 시간과 장소에 따라 다르다(Jaenicke, 2005; Kaarakainen et al., 2008; Bowers et al., 2013; Qi et al., 2014), 일간, 계절내내 다양하며, 대부분 포팡이는 뚜렷한 계절적 변동을 가진다(Wang et al., 2010). 또한, 존재와 확산은 기상학적, 생물학적, 지형학적 문제를 포함한 각각 다른 인자들에 영향을 받는다(De Linares et al., 2010). 그 영향 인자들은 공기질, 인간활동, 기상요소, 계절성 기후인자들이라 할 수 있으며(Lin and Li, 2000; Mitakakis et al., 2003; Rossi et al., 2005), 그 중에서 기상인자들은 포팡이의 가장 중요한 예측변수이다(Gioulekas et al., 2004; Sousa et al., 2008).

부유폴팡이의 발생과 역할, 종류, 포팡이 농도에 영향을 미치는 인자들에 대한 수많은 변수만큼이나 다양한 연구와 상충되는 결론이 있었다. 부유폴팡이 종류와 농도 관련하여 영향인자 측면에서는 온도, 상대습도, 풍속, 일사, 강수, 대기오염가스, 황사, 미세먼지 등의 상관성이 연구되었으나(Burge and Rogers, 2000; Weber, 2003; Wang et al., 2010; Abdel Hameed et al., 2012; Koh et al., 2012; Alghamdi et al., 2014; Pavan and Manjunath, 2014) 서식환경, 포집주기,

측정시간대, 시료채취방법, 기후조건의 차이(Shaffer and Lighthart, 1997)를 감안할 때, 그간의 선행연구들은 포팡이 농도 실태조사에 그대로 참고하거나 적용하기 어려웠다.

본 연구는 포집주기가 길고 포집시간대가 일부 국한되어 야외 부유폴팡이의 일간 거동, 계절적 변동, 포팡이 농도 영향 기상요소 확인이 불명확했던 이전 연구(Kim et al., 2018)의 후속으로 진행하였다. 따라서, 야외 부유폴팡이의 연중 변화와 일간 변화를 파악하기 위해 24절기의 낮과 밤 시간대를 기준하여 국립문화재연구소 보존과학센터 옥상에서 1년간 부유폴팡이 포집과 기상 모니터링을 실시하였다. 그 결과를 통해 부유폴팡이의 일간, 월별, 계절별 거동과 농도 증감을 확인하고자 하였고, 기상현상별(강우, 태풍, 황사/미세먼지) 우점 포팡이를 파악하였으며, 기상특성을 정리하고 부유폴팡이와 기상요소간 상관성 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과는 야외 목조문화재의 생물피해에 관한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 포집 및 관측지점

국립문화재연구소 보존과학센터는 대전광역시 유성구 문지로 132에 위치하며 건물방향은 북서향이다. 지리적 위치는 남쪽과 서쪽을 우성이산이 근접해 둘러싸고 북쪽을 화봉산이 조금 떨어져 에워싼 위치에 자리잡고 있다. 부유폴팡이 포집 및 기상 관측지점은 국립문화재연구소(대전) 보존과학센터 옥상(북위 36° 23' 26.17", 동경 127° 23' 37.15", 해발높이 80 m)으로, 직접 강우를 피하기 위해 비가림 구조물 아래에 위치하였다(Figure 1).

2.2. 부유폴팡이 포집

부유폴팡이의 연중 변화와 일간 변화를 파악하기 위해 24절기의 낮과 밤시간대를 기준하였다. 24절기는 태양의 황도상 위치에 따라 계절적 구분을 하기 위해 만든 것으로, 황도에서 춘분점을 기점으로 15° 간격으로 점을 찍어 총 24개의 절기로 나타낸다(Table 1). 부유폴팡이의 포집주기는 24절기(약 15일)를 기준하여 2018년 8월 7일부터 2019년 7월 23일까지 1년간 진행하였으며 포집시간은 일간 낮(14시)과 밤(23시)으로 하였다. 포집 방법은 공기 포집기(M Air T, Millipore, USA)와 PDA(Potato dextrose agar, Difco, USA) 배지를 사용하여 공기포집량 250 L(140 L/min)로 3회

Figure 1. Monitoring site of airborne fungi. (A) Conservation Science Center(National Research Institute of Cultural Heritage), (B) Sampling point(Rooftop of Conservation Science Center), (C) Day sampling(14:00 p.m.), (D) Night sampling(23:00 p.m.), (E) Weather station instrument.

Table 1. 24 Seasonal divisions

Season	24 Seasonal divisions	Date	Introduction
Spring	Ipchun	February 4	Onset of spring
	Usu	February 19	Snow melts to become rain
	Gyeongchip	March 6	Animals wake up from hibernation
	Chunbun	March 21	The center of spring
	Cheongmyeong	April 5	The day of pure brightness
	Gogu	April 20	Grain rain
Summer	Ipha	May 6	Onset of summer
	Soman	May 21	The day of steady growth
	Mangjong	June 6	The first day of the grain harvest
	Haji	June 22	Summer reach
	Soseo	July 7	Minor heat
	Daeseo	July 23	Great heat
Fall	Ipchu	August 7	The onset of fall
	Cheoseo	August 23	End of heat
	Baengno	September 8	White dew
	Chubun	September 23	The night gradually becomes longer
	Hallo	October 8	The time when cold dew begins to form
	Sanggang	October 23	Fall of the frost
Winter	Ipdong	November 7	The onset of winter
	Soseol	November 22	First snow
	Daeseol	December 7	Big snow
	Dongji	December 22	The longest night of the year.
	Sohan	January 6	Minor cold
	Daehan	January 20	Great cold

반복수로 포집하였다. 공기를 포집한 plate는 28℃의 조건에서 2~3일 배양한 뒤, 집락수(Colony Forming Unit, CFU)를 세어 아래 식에 따라 공기 중 단위 체적당 집락수(CFU/m³)를 계산하였다.

$$\text{CFU/m}^3 = \text{Colony Forming Unit(CFU)} / \text{Air flow(L)} \times 1000(\text{L/m}^3).$$

2.3. 기상 관측

부유곰팡이 포집일과 포집시간대의 기상현상을 파악하기 위하여 자동 기상측정기(Vantage Pro2 Plus, Davis Instrument, USA)를 보존과학센터 옥상의 부유곰팡이 포집 지점 인근 10 m 지점에 설치하였다. 기상요소 11개 항목(기온, 습도, 이슬점온도, 풍속, 풍향, 해면기압, 강수량, 강수일수, 일사세기, 자외선지수, 증발량)에 대하여 2018년 8월부터 2019년 7월까지 1년간 1시간 단위 관측값을 수집하였다(Table 2).

2.4. 상관성분석

부유곰팡이 농도와 기상요소 간 상관성을 분석하고 비교하였다. 낮(14:00)과 밤(23:00)의 부유곰팡이 농도와 동일 시간에서의 기상요소 관측값을 정리하여 피어슨 상관분석(IBM SPSS Statistics 24, IBM, USA)을 실시하였다.

3. 결 과

3.1. 부유곰팡이 농도

2018년 8월부터 2019년 7월까지 부유곰팡이의 연평균 농도는 283.2 CFU/m³, 최고 농도는 11월 676.0 CFU/m³, 최저 농도는 4월 63.8 CFU/m³로 나타났다. 계절별로는 가을 449.2 CFU/m³, 여름 296.3 CFU/m³, 겨울 199.6 CFU/m³, 봄 187.8 CFU/m³ 순으로 높았다. 23시의 부유곰팡이 평균농도는 357.6 CFU/m³로 14시의 부유곰팡이 평균농도 208.9 CFU/m³보다 1.7배 높았다. 부유곰팡이 농도는 가을과 밤시간에 높은 경향을 보였다(Table 3).

Table 2. Meteorological 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	°	
	Barometer	hPa	
	Precipitation	mm	
	Precipitation days	-	
	Solar radiation	W/m ²	
	UV index	-	
	Evaporation	mm	

Table 3. Concentration of airborne fungi*

Year	2018						2019						Annual
Season	Summer		Fall		Winter		Spring		Summer				
Month	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	
Mean	317.0	354.3	317.2	676.0	187.5	132.8	278.5	348.0	63.8	151.5	261.7	310.3	283.2
			449.2		199.6		187.8		296.3				
Mean-day (14:00)	306.7	262.0	253.0	610.0	175.0	125.0	43.0	138.0	69.0	135.0	212.0	178.0	208.9
			375.0		114.3		114.0		232.2				
Mean-night (23:00)	327.3	446.7	381.3	742.0	200.0	140.7	514.0	558.0	58.7	168.0	311.3	442.7	357.6
			523.3		284.9		261.6		360.4				

* Unit: CFU/m³.

Table 4. Airborne fungi after culture for 3 days

Year-Month	Date	14:00	23:00	Date	14:00	23:00
2018-08	7,8			23
2018-09	10			27
2018-10	10			22
2018-11	8			22
2018-12	7			21
2019-01	7			21
2019-02	7			19
2019-03	5			20
2019-04	4			22
2019-05	7			21
2019-06	4			24
2019-07	8			23

부유곰팡이의 3일 배양 후 사진은 Table 4와 같으며, 포집일의 기상요소값과 부유곰팡이 농도는 Table 5에 정리하였다. 2018년 8월 23일, 2018년 11월 8일, 2019년 2월 19일, 2019년 3월 20일에는 강우가 발생하였으며, 그중 2018년 8월 23일은 강한 바람과 강우를 동반한 19호 태풍 솔릭의 영향이 있었다. 또한 2019년 3월 5일(낮, 밤), 3월 20일(낮)에는 황사/미세먼지 경보가 있었다. 부유곰팡이 농도는 태풍발생일인 2018년 8월 23일에 낮 508.0 CFU/m³, 밤 361.3 CFU/m³, 강우발생일인 2018년 11월 8일에 낮 1080.0 CFU/m³, 밤 1274.7 CFU/m³, 2019년 2월 19일에 낮 34.0 CFU/m³, 밤 933.3 CFU/m³, 2019년 3월 20일에는 낮 218.0 CFU/m³, 밤 1016.0 CFU/m³로 강우시간대와 강우누적시간대에서 급격히 증가하였다. 황사/미세먼지발생일인 2019년 3월 5일에 낮 58.0 CFU/m³, 밤 100.0 CFU/m³, 3월 20일에 낮 218.0 CFU/m³로 나타났다. 평일에 비해 강우발생일과 태풍발생일의 부유곰팡이 농도는 급격한 상승이 확인되었으나 황사/미세먼지발생일의 부유곰팡이 농도는 뚜렷한 변화가 없었다. 곰팡이 종류도 다르게 구분되었는데 평일에 비해 강우발생일과 태풍발생일의 곰팡이 종류는 각각 다른 차이를 보였으나 황사/미세먼지발생일은 평일과 다르지 않

았다. 강우, 태풍, 황사/미세먼지 등 기상현상에 따라 부유곰팡이 농도, 종류, 우점이 다르게 나타났다.

3.2. 기상 특성

2018년 8월 7일부터 2019년 7월 23일까지의 기상 요소를 관측한 연간값과 계절값을 Table 6에 정리하였다. 14시(낮), 23시(밤)의 기상요소 관측값에 대한 정리결과, 평균기온은 낮 18.1℃, 밤 12.3℃로 낮이 5.8℃ 높았고 평균상대습도는 낮 49.6%, 밤 71.2%로 밤이 21.6% 높았다. 평균이슬점 온도는 낮 6.6℃, 밤 7.0℃로 밤이 0.4℃ 높았다. 평균풍속은 낮 1.4 m/s, 밤 0.6 m/s로 낮이 0.8 m/s 빨랐다. 주풍향은 낮 247.5° (WSW), 밤 270° (W)로 나타났다. 평균해면기압은 낮 1016.0 hPa, 밤 1016.4 hPa로 밤이 다소 높았고 총강수량은 누적기준 낮 27.2 mm, 밤 58.8 mm로 나타났으며 강수일수는 낮 3일, 밤 4일로 나타났다. 평균일사세기는 낮 549.4 W/m², 밤 0 W/m², 총증발량은 낮 8.4 mm, 밤 0.7 mm로 낮이 7.7 mm 많았다. 평균자외선지수는 낮 3.2, 밤 0.0으로 나타났다. 계절별 정리결과, 평균온도는 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 높게 나타났으며 평균상대습도는

Table 5. Meteorological element(at time 14, 23) and the concentration of airborne fungi measured at rooftop of the Conservation Science Center

Date	Time	Temp ¹ (℃)	Humidity ² (%)	Dew Pt. ³ (℃)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Barometer (hPa)	Precipitation (mm)	Precipitation days	Solar radiation (W/m ²)	Evaporation (mm)	UV index	CFU/m ³
2018 08-07	23	29.2	76	24.5	0.4	270	1007.2	0	0	0	0.03	0	293.3
2018 08-08	14	34.8	56	24.8	1.3	270	1007.0	0	0	875	0.63	7.1	105.3
2018 08-23	14	31.4	66	24.3	2.2	67.5	998.7	0.8	1	279	0.23	2.8	508.0
2018 08-23	23	27.4	80	23.7	3.1	67.5	992.9	0.8	1	0	0.05	0	361.3
2018 09-10	14	26.8	50	15.5	1.3	45	1020.3	0	0	582	0.41	4.9	354.0
2018 09-10	23	20.1	62	12.6	0.4	67.5	1022.1	0	0	0	0.03	0	437.3
2018 09-27	14	23.2	50	12.2	1.3	45	1017.6	0	0	757	0.46	4.5	170.0
2018 09-27	23	16.6	77	12.5	0.4	225	1019.0	0	0	0	0.03	0	456.0
2018 10-10	14	16.6	50	6.1	2.2	247.5	1017.6	0	0	546	0.36	3.2	224.0
2018 10-10	23	9.6	66	3.5	0.4	247.5	1020.6	0	0	0	0.03	0	145.3
2018 10-22	14	20.1	47	8.4	0.4	45	1020.0	0	0	565	0.33	2.7	282.0
2018 10-22	23	12	80	8.7	0	0	1019.2	0	0	0	0.03	0	617.3

Date	Time	Temp ¹ (°C)	Humidity ² (%)	Dew Pt. ³ (°C)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Barometer (hPa)	Precipitation (mm)	Precipitation days	Solar radiation (W/m ²)	Evaporation (mm)	UV index	CFU/m ³
2018 11-08	14	14.7	94	13.7	0	315	1011.7	10.8	1	35	0.03	0	1080.0
2018 11-08	23	13.7	89	11.9	1.3	180	1010.6	31.2	1	0	0.03	0	1274.7
2018 11-22	14	7.6	33	-7.7	1.8	45	1025.0	0	0	516	0.25	1.7	140.0
2018 11-22	23	1.2	77	-2.4	0.4	247.5	1027.7	0	0	0	0.03	0	209.3
2018 12-07	14	-3.5	43	-14.3	2.2	270	1032.5	0	0	444	0.15	1.4	248.0
2018 12-07	23	-6.7	70	-11.2	0.4	270	1034.2	0	0	0	0	0	153.3
2018 12-21	14	9.7	53	0.6	0.4	22.5	1022.3	0	0	109	0.05	0.5	102.0
2018 12-21	23	5.2	73	0.8	0.4	360	1023.5	0	0	0	0.03	0	246.7
2019 01-07	14	3.3	53	-5.4	1.3	45	1028.1	0	0	432	0.18	1.2	102.0
2019 01-07	23	-1.6	77	-5.1	0.4	292.5	1028.7	0	0	0	0	0	196.0
2019 01-21	14	3.9	58	-3.6	1.8	247.5	1021.9	0	0	401	0.18	1.3	148.0
2019 01-21	23	1.8	68	-3.5	0.4	180	1021.8	0	0	0	0.03	0	85.3
2019 02-07	14	2.4	29	-13.9	2.7	270	1021.9	0	0	451	0.23	1.7	52.0
2019 02-07	23	-4.8	59	-11.6	0.9	270	1027.4	0	0	0	0.03	0	94.7
2019 02-19	14	2.7	92	1.5	0.9	67.5	1016.8	15.6	1	77	0.03	0.3	34.0
2019 02-19	23	-0.3	92	-1.4	0	292.5	1022.8	15.6	1	0	0	0	933.3
2019 03-05	14	13.7	43	1.3	0.9	180	1020.2	0	0	424	0.23	1.7	58.0
2019 03-05	23	8.8	60	1.4	0	270	1021.0	0	0	0	0.03	0	100.0
2019 03-20	14	16.7	47	5.3	0.9	247.5	1012.9	0	0	118	0.1	0.7	218.0
2019 03-20	23	10.5	93	9.4	0.4	270	1001.7	11.2	1	0	0	0	1016.0
2019 04-04	14	16.7	31	-0.6	1.3	247.5	1018.8	0	0	855	0.51	3.8	64.0
2019 04-04	23	8.8	38	-4.8	0.9	180	1015.1	0	0	0	0.05	0	22.7
2019 04-22	14	27.9	38	12.3	0.9	247.5	1014.1	0	0	866	0.58	5.9	74.0
2019 04-22	23	18.8	72	13.7	0.4	202.5	1016.4	0	0	0	0.03	0	94.7
2019 05-07	14	21.6	20	-2.4	1.3	247.5	1016.1	0	0	914	0.61	4.5	82.0
2019 05-07	23	13.9	38	-0.2	0.9	202.5	1017.0	0	0	0	0.05	0	122.7
2019 05-21	14	23.6	31	5.4	3.1	247.5	1006.3	0	0	968	0.69	6	188.0
2019 05-21	23	16.6	63	9.5	0.9	225	1007.1	0	0	0	0.05	0	213.3
2019 06-04	14	30.3	40	15.2	1.3	247.5	1008.6	0	0	883	0.63	5.2	184.0

Date	Time	Temp ¹ (°C)	Humidity ² (%)	Dew Pt. ³ (°C)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Barometer (hPa)	Precipitation (mm)	Precipitation days	Solar radiation (W/m ²)	Evaporation (mm)	UV index	CFU/m ³
2019 06-04	23	20.7	78	16.7	0.4	270	1010.7	0	0	0	0.03	0	268.0
2019 06-24	14	29.1	51	17.9	1.3	247.5	1012.3	0	0	929	0.61	5.4	240.0
2019 06-24	23	22.6	73	17.5	0	247.5	1015.2	0	0	0	0.03	0	354.7
2019 07-08	14	27.7	53	17.2	1.3	45	1006.6	0	0	320	0.3	3	282.0
2019 07-08	23	23.1	69	17.1	0	45	1007.3	0	0	0	0.03	0	381.3
2019 07-23	14	33.2	62	25	0.9	180	1005.6	0	0	840	0.58	7.1	74.0
2019 07-23	23	27.8	78	23.6	0.4	247.5	1005.4	0	0	0	0.03	0	504.0

¹ Temp: Air temperature.² Humidity: Relative humidity.³ Dew Pt.: Dew point temperature.**Table 6.** Annual and seasonal values in Table 5

Period	Time	Temp ¹ (°C)	Humidity ² (%)	Dew Pt. ³ (°C)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Barometer (hPa)	Precipitation (mm)	Precipitation days	Solar radiation (W/m ²)	Evaporation (mm)	UV index	CFU/m ³
		Mean	Mean	Mean	Mean	Most Frequency	Mean	Sum	Sum	Mean	Sum	Mean	Mean
Annual	Total	15.2	60.4	6.8	1.0	247.5	1016.2	62.6	4	274.7	9.0	1.6	283.2
	14	18.1	49.6	6.6	1.4	247.5	1016.0	27.2	3	549.4	8.4	3.2	208.9
	23	12.3	71.2	7.0	0.6	270	1016.4	58.8	4	0.0	0.7	0.0	357.6
Spring (3-5)	Total	16.5	47.8	4.2	1.0	247.5	1013.9	14.4	1	345.4	2.9	1.9	187.8
	14	20.0	35.0	3.6	1.4	247.5	1014.7	0.0	0	690.8	2.7	3.8	114.0
	23	12.9	60.7	4.8	0.6	270	1013.1	11.2	1	0.0	0.2	0.0	261.6
Summer (6-8)	Total	28.1	65.2	20.6	1.1	247.5	1006.5	1.2	1	343.8	3.2	2.6	296.3
	14	31.1	54.7	20.7	1.4	247.5	1006.5	0.8	1	687.7	3.0	5.1	232.2
	23	25.1	75.7	20.5	0.7	270	1006.5	0.8	1	0.0	0.2	0.0	360.4
Fall (9-11)	Total	15.2	64.6	7.9	0.8	45	1019.3	31.4	1	250.1	2.0	1.4	449.2
	14	18.2	54.0	8.0	1.2	45	1018.7	10.8	1	500.2	1.8	2.8	375.0
	23	12.2	75.2	7.8	0.5	247.5	1019.9	31.2	1	0.0	0.2	0.0	523.3
Winter (12-2)	Total	1.0	63.9	-5.6	1.0	270	1025.2	15.6	1	159.5	0.9	0.5	199.6
	14	3.1	54.7	-5.9	1.6	270	1023.9	15.6	1	319.0	0.8	1.1	114.3
	23	-1.1	73.2	-5.3	0.4	270	1026.4	15.6	1	0.0	0.1	0.0	284.9

¹ Temp: Air temperature.² Humidity: Relative humidity.³ Dew Pt.: Dew point temperature.

여름, 가을, 겨울, 봄 순으로 높았다. 총강수량은 가을, 겨울, 봄, 여름 순으로 많았으며 강수일수는 계절별 1일씩 동일하였다. 일사세기는 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 높았다(Table 6). 특이사항으로는 태풍이 2018년 8월 23일에 있었고, 강우는 2018년 8월 23일, 2018년 11월 8일, 2019년 2월 19일, 2019년 3월 20일에 발생하였으며, 황사/미세먼지가 2019년 3월 5일과 3월 20일(14시)에 극심하였다.

3.3. 부유곰팡이 농도와 기상요소간 상관성 분석

부유곰팡이 농도와 기상요소간 상관성 분석 결과, 부유곰팡이 농도는 강수량과는 0.718($p<0.01$), 강수일수와는 0.687($p<0.01$), 상대습도와는 0.627($p<0.01$)로 강한 양의 선형 상관성이 나타났으며, 이슬점온도와는 0.300($p<0.05$)으로 약한 양의 선형 상관성이 나타났다. 반면, 일사량, 증발량, 자외선지수, 기압과는 약한 음의 선형 상관성이 확인되었다(Table 7).

Table 7. Correlation analysis between meteorological elements and the concentration of airborne fungi

Element	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Dew Pt. ¹ (°C)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Barometer (hPa)	Precipitation (mm)	Precipitation days	Solar radiation (W/m ²)	Evaporation (mm)	UV index	CFU/m ³
Air temperature (°C)	1											
Relative humidity (%)	-0.146	1										
Dew Pt. ¹ (°C)	0.890**	0.311*	1									
Wind speed (m/s)	0.159	-0.501**	-0.076	1								
Wind direction (°)	-0.205	0.075	-0.183	-0.108	1							
Barometer (hPa)	-0.774**	-0.163	-0.800**	-0.23	0.104	1						
Precipitation (mm)	-0.173	0.515**	0.027	-0.091	0.044	-0.13	1					
Precipitation days	-0.034	0.579**	0.193	0.087	-0.057	-0.397**	0.763**	1				
Solar radiation (W/m ²)	0.441**	-0.690**	0.092	0.527**	-0.036	-0.102	-0.233	-0.263	1			
Evaporation (mm)	0.553**	-0.656**	0.212	0.497**	-0.022	-0.22	-0.239	-0.256	0.979**	1		
UV index	0.581**	-0.565**	0.288*	0.457**	-0.051	-0.244	-0.217	-0.216	0.947**	0.976**	1	
CFU/m ³	0.045	0.627**	0.300*	-0.214	0.041	-0.287*	0.718**	0.687**	-0.341*	-0.319*	-0.288*	1

¹ Dew Pt.: Dew point temperature.

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

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

4. 고 찰

4.1. 부유곰팡이 농도

본 연구에서 부유곰팡이 농도는 가을과 밤시간에 높은 경향을 보였다. 가을철에 높았던 이유는 곰팡이의 농도는 그 발생원인 식물체의 부패와 관련이 깊은데(Chakraborty *et al.*, 2000), 가을철에는 풍부한 죽은 식물체, 적절한 온도와 습도 등 곰팡이 농도 증가가 유발되는 조건이 형성되기 때문이다(Sarica Okten *et al.*, 2005). 그 다음으로 높은 습도 조건을 가지는 계절순으로 부유곰팡이 농도가 증가하는 것으로 판단되었다. 이는 곰팡이 농도가 가을과 여름이 가장 높고, 겨울과 봄이 가장 낮았다는 다수의 연구결과와도 일치하고 있다(Shelton *et al.*, 2002; Sautour *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010; National Research Institute of Cultural Heritage, 2018). 또한, 부유곰팡이 농도는 밤시간에도 높게 나타났는데 이는 밤의 상대습도가 높기 때문이다. 상대습도는 곰팡이 생존력에 영향을 주는 민감한 인자인데(Abdel Hameed *et al.*, 2012), 높은 습도, 구름 낀 날씨는 성장세포의 군집을 이루어 공기중 곰팡이의 생존력을 증가시키고

(Zhu *et al.*, 2003), 포자 확산에도 기여하는 것으로 나타났다(Oliveira *et al.*, 2009). 본 연구에서 부유곰팡이 농도는 강우시, 강우시작직후, 강우종료직후 모두에서 급격히 증가하였는데, 이는 강수조건인 경우, 대기 곰팡이 포자를 제거함으로써 부유곰팡이 농도를 감소시킨다는 일부 연구자(Burge and Rogers, 2000; Weber, 2003; Wang *et al.*, 2010)와 다른 결과를 보였다. 이와 관련하여 향후 장마와 같은 연속 강우나 강설 조건에서의 부유곰팡이 농도를 확인할 필요가 있다. 황사/미세먼지 정보가 있었던 2019년 3월 5일(낮, 밤), 3월 20일(낮)에는 부유곰팡이 농도의 뚜렷한 증가나 감소가 나타나지 않았는데 이는 황사발생시 세균농도는 증가하나 곰팡이농도는 영향을 받지 않는다는 결과(Koh *et al.*, 2012)와도 일치하였다.

4.2. 기상 특성

부유곰팡이 농도 증감이나 거동에 대한 상관성 파악을 위해 평균기온, 평균상대습도, 평균이슬점온도, 평균풍속, 주풍향, 평균해면기압, 총강수량, 강수일수, 평균일사세기, 총증발량, 평균자외선지수를 알아보았다. 하루 일기에 있

어서 부유곰팡이의 증감에 대하여 평균기온, 평균상대습도, 총강수량, 강수일수가 중요한 기상요소로 파악되었으나, 계절로 구분하였을 때 부유곰팡이 농도순위는 특정 기상요소의 계절별 순위를 따르지 않고 가을, 여름, 겨울, 봄 순으로 나타났다. 이것으로 보아 부유곰팡이의 생태적 지위 즉, 식물체의 분해자라는 자연계에서의 역할이 가을철에 우선 반영되었으며, 다음으로 상대습도의 계절별 순위를 따르는 것으로 확인되었다. 다시 말해 가을철에는 낙엽, 1년생 식물종 등 다양한 식물체의 부패 요구가 많아지므로 이런 가을철 환경 내의 영양 상태는 에너지 흐름이나 생태계 내의 영양 순환속에서 부유곰팡이의 기여와 농도 증가를 일으키기 때문이다(Maier *et al.*, 2010).

4.3. 부유곰팡이 농도와 기상요소간 상관성

24절기마다 14시, 23시 정각에서 획득된 부유곰팡이 농도, 기상자료를 토대로 부유곰팡이 농도와 기상요소간 상관성 분석 결과, 부유곰팡이 농도는 강수량과는 0.718 ($p<0.01$), 강수일수와는 0.687($p<0.01$), 상대습도와는 0.627 ($p<0.01$)로 강한 양의 선형 상관성이 나타났고 이슬점온도와는 0.300($p<0.05$)으로 약한 양의 선형 상관성이 나타났다. 반면, 일사량 -0.341($p<0.05$)을 포함하여 증발량, 자외선지수, 기압과는 약한 음의 선형 상관성이 확인되었다. 이러한 결과는 일평균 부유곰팡이 농도와 일평균 기상값으로 상관성 분석을 실시하여 부유곰팡이 농도와 일평균 상관성이 강수일수 0.752($p<0.01$), 상대습도 0.666($p<0.05$), 강수량 0.657 ($p<0.05$), 일사량 -0.614($p<0.05$)로 나타난 앞선 연구결과(Kim *et al.*, 2018)와 비교하였을때 상관성 순위 변화와 상관관계가 추가 도출되었다. 따라서, 본 연구결과를 1일 평균값, 14시 정각값, 23시 정각값으로 구분하여 상관성 분석결과를 비교해보았다. 일평균 부유곰팡이 농도와 일평균 기상값으로 정리하여 상관성 분석을 실시한 결과는 강수량 0.872($p<0.01$), 상대습도 0.758($p<0.01$), 강수일수 0.745 ($p<0.01$), 일사량 -0.447($p<0.05$)로 나타났고 14시 정각의 부유곰팡이 농도와 14시 정각 기상값으로 정리하여 상관성 분석을 실시한 결과는 강수일수 0.591($p<0.01$), 상대습도 0.537($p<0.01$)로 나타났으며, 23시 정각의 부유곰팡이 농도와 23시 정각 기상값으로 정리하여 상관성 분석을 실시한 결과는 강수량 0.850($p<0.01$), 강수일수 0.772($p<0.01$), 상대습도 0.710($p<0.01$)으로 나타났다. 이와 같이 측정자료를 일평균과 시간대별로 구분하였을 때도 부유곰팡이 농도와 관련하여 강수량, 강수일수, 상대습도가 주요 기상요소임을 모든 경우에서 재확인할 수 있었으며 낮보다는 밤에서 상관 계수가 높았다. 향후 장마와 같은 연속 강우나 강설시 부유

곰팡이 농도 증감 변화에 대한 확인이 필요하며 더 나아가 부유곰팡이 종별 농도와 기상요소간의 상관성도 분석이 필요하다.

5. 결론

1. 부유곰팡이 농도는 월별로는 11월이 가장 높았고 4월이 가장 낮았으며 계절별로는 가을, 여름, 겨울, 봄 순으로 높았다. 일간에서는 23시가 14시 보다 1.7배 높았다. 가을과 밤시간에 높았던 이유는 가을에는 낙엽 등 죽은 식물체의 증가가 그 원인이며, 밤시간은 낮시간 대비 높은 상대습도 때문이었다. 강우, 태풍, 황사/미세먼지에 따라 부유곰팡이 농도, 종류, 우점은 달랐다.

2. 14시(낮)는 평균기온, 평균풍속, 평균풍속, 평균일사세기, 총증발량이 높거나 많았으며 23시(밤)는 평균상대습도, 평균이슬점온도, 총강수량, 강수일수가 높거나 많았다. 계절별로는 평균온도는 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 높게 나타났으며, 평균상대습도는 여름, 가을, 겨울, 봄 순으로 높았다. 총강수량은 가을, 겨울, 봄, 여름 순으로 많았으며 강수일수는 계절별 1일씩 동일하였다. 일사세기는 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 높았다. 부유곰팡이 측정일에 발생한 특이사항으로는 태풍, 황사/미세먼지가 있었다. 부유곰팡이 농도순위는 특정 기상요소의 계절별 순위를 따르지는 않고 가을, 여름, 겨울, 봄 순으로 나타났는데 이것은 가을이 죽은 식물체의 발생 증가 시점이자 부유곰팡이의 증식과 활성이 큰 시기인 점이 우선 작용되고 다음으로 상대습도의 계절별 순위를 따르는 것으로 해석된다.

3. 부유곰팡이 농도는 강수량, 강수일수, 상대습도와 강한 양의 선형 상관성이 나타났다. 이 결과는 부유곰팡이 농도와 기상요소 일평균값, 14시 관측값, 23시 관측값에 대하여 각각 실시한 상관성 분석에서도 재확인되었다. 강수량, 강수일수, 상대습도는 야외 부유곰팡이의 농도 증감이나 거동에 영향을 미치는 주요 기상요소임을 확인할 수 있었다.

사 사

이 연구는 2018, 2019년도 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, Study on some

- factors affecting survivability of airborne fungi. *Science of the Total Environment*, 414, 696-700.
- Alghamdi, M.A., Shamy, M., Redal, M.A., Khoder, M., Award, A.H. and Elserougy, S., 2014, Microorganisms associated particulate matter: A preliminary study. *Science of the Total Environment*, 479-480, 109-116.
- Ariya, P.A., Sun, J., Eltoumy, N.A., Hudson, E.D., Hayes, C.T. and Kos, G., 2009, Physical and chemical characterization of bioaerosols - Implications for nucleation processes. *International Reviews in Physical Chemistry*, 28(1), 1-32.
- Bowers, R.M., Clements, N., Emerson, J.B., Wiedinmyer, C., Hannigan, M.P. and Fierer, N., 2013, Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near-surface atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12097-12106.
- Burge, H.A. and Rogers, C.A., 2000, Outdoor allergens. *Environmental Health Perspectives*, 108(4), 653-659.
- Chakraborty, S., Sen, S.K. and Bhattacharya, K., 2000, Indoor and outdoor aeromycological survey in Burdwan, West Bengal, India. *Aerobiologia*, 16(2), 211-219.
- De Linares, C., Belmonte, J., Canela, M., Guardia, C.D., Sanchez, F.A., Sabariego, S. and Alonso-Perez, S., 2010, Dispersal patterns of *Alternaria conidia* in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(12), 1491-1500.
- Frohlich-Nowoisky, J., Pickersgill, D.A., Despres, V.R. and Poschl, U., 2009, High diversity of fungi in air particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(31), 12814-12819.
- Gioulekas, D., Balafoutis, C., Damialis, A., Papakosta, D., Gioulekas, G. and Patakas, D., 2004, Fifteen years' record of airborne allergenic pollen and meteorological parameters in Thessaloniki, Greece. *International Journal of Biometeorology*, 48(3), 128-136.
- Jaenicke, R., 2005, Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere. *Science*, 308(5718), 73-73.
- Jeong, G.J., 2007, Picture book to the microbiology. Seoul National University-Institute of Microbiology, Seoul, 1, 186-186. (in Korean)
- Kaarakainen, P., Meklin, T., Rintala, H., Hyvarinen, A., Karkkainen, P., Vepsäläinen, A., Hirvonen, M.R. and Nevalainen, A., 2008, Seasonal variation in airborne microbial concentrations and diversity at landfill, urban and rural sites. *Clean Soil Air Water*, 36(7), 556-563.
- Kim, M.N., Lim, B.A., Hong, J.Y., Lee, J.M., Park, J.H. and Jeong, S.Y., 2018, Comparative analysis of the correlation between local meteorological elements and the concentration of airborne fungi in the Beopjusa and Seonamsa temples. *Journal of Conservation Science*, 34(4), 283-293. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.H., Lee, H.J., Lee, M.Y., Jeong, S.H. and Chung, Y.J., 2017, Monitoring on biological distribution around historical wooden buildings adjacent to river - With the case study of Silleuksa temple, Yeosu city -. *Journal of Conservation Science*, 33(4), 267-274. (in Korean with English abstract)
- Koh, J.Y., Jang, C.G., Cha, M.J., Park, K.N., Kim, M.K. and Kim, J.S., 2012, Distribution and characteristics of microorganisms associated with settled particles during Asian dust events. *Korean Journal of Microbiology*, 48(2), 134-140.
- Lee, H.J., Oh, G.B., Yang, H.C., Park, J.C., Park, B.J. and Na, H.J., 2014, Pictorial book of the mold. Korean Fungi Research Society, Seoul, 1, 76, 134. (in Korean)
- Lin, W.H. and Li, C.S., 2000, Associations of fungal aerosols, air pollutants and meteorological factors. *Aerosol Science and Technology*, 32(4), 359-368.
- Maier, R.M., Pepper, I.L. and Gerba, C.P., 2010, *Environmental Microbiology*, second edition. Science Press, Beijing, 91-92.
- Mitakakis, T.Z., O'Meara, T.J. and Tovey, E.R., 2003, The effect of sunlight on allergen release from spores of the fungus *Alternaria*. *Grana*, 42(1), 43-46.
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2018, Research on pattern analysis and prediction for biodeterioration of wooden cultural heritages. 22, 36-36. (in Korean)
- Oliveira, M., Ribeiro, H., Delgado, J.L. and Abreu, I., 2009, The effects of meteorological factors on airborne fungal spore concentration in two areas differing in urbanisation level. *International Journal of Biometeorology*, 53(1), 61-73.
- Pavan, R. and Manjunath, K., 2014, Qualitative analysis of indoor and outdoor airborne fungi in cowshed. *Journal of Mycology*, 2014, 1-8.
- Qi, J., Shao, Q., Xu, W., Gao, D. and Jin, C., 2014, Seasonal distribution of bioaerosols in the coastal region of Qingdao. *Journal of Ocean University of China*, 13(1), 57-65.
- Rossi, V., Bugiani, R., Giosué, S. and Natali, P., 2005, Patterns of airborne conidia of *Stemphylium vesicarium*, the causal agent of brown spot disease of pears, in relation to weather conditions. *Aerobiologia*, 21(3-4), 203-216.
- Sarica Okten, S., Asan, A., Tungan, Y. and Ture, M., 2005, Airborne fungal concentrations in east patch of Edirne city (Turkey) in autumn using two sampling methods. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 6(1), 97-106.
- Sautour, M., Sixt, N., Dalle, F., L'Ollivier, C., Fourquet, V., Calinon, C., ... Bonnin, A., 2009, Profiles and seasonal distribution of airborne fungi in indoor and outdoor environments at a French hospital. *Science of the Total Environment*, 417(1-3), 105-115.

- Environment, 407(12), 3766-3771.
- Sesartic, A. and Dallafior, T.N., 2011, Global fungal spore emissions, review and synthesis of literature data. Biogeosciences, 8(5), 1181-1192.
- Sesartic, A., Lohmann, U. and Storelvmo, T., 2013, Modelling the impact of fungal spore ice nuclei on clouds and precipitation. Environmental Research Letters, 8(1), 014029, 1-8.
- Shaffer, B.T. and Lighthart, B., 1997, Survey of culturable airborne bacteria at four diverse locations in Oregon: urban, rural, forest and coastal. Microbial Ecology, 34(3), 167-177.
- Shelton, B.G., Kirkland, K.H., Flanders, W.D. and Morris, G.K., 2002, Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States. Applied and Environmental Microbiology, 68(4), 1743-1753.
- Sousa, S.I.V., Martins, F.G., Pereira, M.C., Alvim-Ferraz, M.C.M., Ribeiro, H., Oliveira, M. and Abreu, I., 2008, Influence of atmospheric ozone, PM10 and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores. Atmospheric Environment, 42(32), 7452-7464.
- Wang, W., Ma, X., Ma, Y., Mao, Lin., Wu, F. and Ma, X., 2010, Seasonal dynamics of airborne fungi in different caves of the Mogao Grottoes, Dunhuang, China. International Biodeterioration & Biodegradation, 64, 461-466.
- Weber, R.W., 2003, Meteorologic variables in aerobiology. Immunology and Allergy Clinics of North America, 23(3), 411-422.
- Zhu, H., Phelan, P.E., Duan, T., Raupp, G.B., Fernando, H.J.S. and Che, F., 2003, Experimental study of indoor and outdoor airborne bacterial concentrations in Tempe, Arizona, USA. Aerobiologia, 19(3-4), 201-211.