

공주 송산리 고분 내 미생물 분포 및 보존환경 연구

이민영* | 김대운* | 정용재¹

*한국전통문화대학교 문화재예방보존연구소, 한국전통문화대학교 문화유산융합대학원 수리복원학과

Conservation Environmental Assessment and Microbial Distribution of the Songsan-ri Ancient Tombs, Gongju, Korea

Min Young Lee* | Dae Woon Kim* | Yong Jae Chung¹

*Institute of Preventive Conservation for Cultural Property, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 323-812, Korea
Department of Heritage Conservation & Restoration, Graduate School of Convergence Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 323-812, Korea

¹Corresponding Author : iamchung@nuch.ac.kr, +82-41-830-7365

초록 공주 송산리 고분군은 1997년 남조류의 발생 이후, 지속적으로 생물피해에 의한 정밀조사가 이루어져 왔다. 6호분 현실은 조사기간 동안 18.6~19.8℃, 94.3~99.9%, 무령왕릉 현실은 17.3~18.53℃, 73.2~96.45% 분포를 보였으며, 고분 내부의 송풍구를 재설치하는 공사를 전후로 하여 습도의 변화폭이 크게 나타났다. 외부온도가 높아지면 결로는 바닥면과 북측방향에 집중적으로 나타났으며, 특히 공조기가 가동 중일 때 송풍구로부터 불어오는 바람의 방향에 의해 각 방위의 벽체에서 크기는 2.8℃까지 온도차가 확인되었다. 고분 내부의 공기중 및 벽체 표면에서 곰팡이보다 세균의 개체수가 더 높게 나타났으며 *Alternaria* sp., *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. 등의 곰팡이 20종과 *Pseudomonas* sp., *Arthrobacter* sp. 등 세균 19종을 분리 동정하였다. 고분 내부에 존재하는 미생물은 문화재의 원형 손상 등의 문제를 발생시킬 수 있으므로 미생물의 성장 가능성을 예측하고 고분 내 미시환경 조건이 벽화의 손상에 미치는 영향성을 파악하여 고분의 장기적인 보존방안을 마련해야 한다.

중심어: 고분, 온습도, 표면온도, 결로, 미생물

ABSTRACT After occurrence of Cyanobacteria in 1997, Songsan-ri tombs located in Gongju have been investigated to monitor for biological damage. The room temperature of Tomb No.6 was 18.6~19.8℃ and the relative humidity was 94.3~99.9%. The temperature of Royal Tomb of King Muryeong was 17.3~18.53℃ and the relative humidity was 73.2~96.45%. The variation of relative humidity increased after setting up air vents. If the outside temperature increases, dew condensation occurs on the floor and the north side. When conditioning equipment operates, the maximum temperature differences between walls is 2.8℃. Bacteria from the air of the tomb and on the surface of the walls outnumbered fungi. 20 species of fungi including *Alternaria* sp., *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., and 19 species of bacteria including *Pseudomonas* sp., *Arthrobacter* sp., are identified. Microbes in the tombs may damage cultural heritage. The growth possibility of microbes should be estimated because the microbes in the tombs may damage mural painting. The interrelation between microenvironmental condition and biological damage of mural painting should be researched to

come up with an long-term conservation method.

Key Words: Tomb, Temperature & Relative humidity, Surface temperature, Dew condensation, Microorganisms

1. 서 론

고분은 과거에 시신을 매장하기 위해 만든 무덤으로, 외부 환경과 차단된 저온·고습의 환경조건을 유지한다. 관람객 및 조사원의 출입 등으로 외부로부터 공기가 유입되면 고분내의 자연적인 환경조건이 일시적으로 변화할 수 있다. 계절적으로 발생하는 외부공기와 내부공기의 온도차는 벽화에 응결현상을 발생시킬 수 있으며, 이는 고분벽화의 구조적 안정 및 생물피해를 발생시키는 주요 원인으로써 작용하게 된다. 특히 고분벽화를 조성할 때 사용되는 접착제나 유기안료 등은 미생물의 영양원이 될 수 있다(Hwang, 2001). 곰팡이와 세균이 분비하는 세포외효소 작용(Rölleke *et al.*, 1998)으로 인해 벽화의 색채를 손상시키거나(Jang, 2002) 구조적인 손상까지도 야기할 수 있다.

송산리고분군은 백제시대 고분군으로 무령왕릉을 포함한 7기의 고분이 있다. 송산리 고분군의 정비는 일제강점기부터 지속적으로 이루어진 것으로 파악되는데 1~4호 석실분의 조사 후 도로와 조경시설이 이루어졌다. 해방 후 송산리 고분군에 대한 정비 내용은 구체적으로 남아있지 않으나 1971년 무령왕릉의 발견 이후 고분군에 대한 차별한 관심으로 대외적 공개를 위한 편의시설과 더불어 외형정비가 폭넓게 이루어져왔다. 무령왕릉은 발굴 이후 일반에게 공개되어 오다 1995년 여름 공주지방에 내린 심한 강우 현상으로 인하여 5호분에 심한 누수현상이 발생됨에 따라 벽돌 표면의 수분과 높은 상대습도로 인해 전실 전체에 걸쳐 *Lyngbya spp.*와 *Gloeocapsa spp.* 남조류가 발생되었다. 국립문화재연구소 주관으로 1996년부터 5월부터 1997년 4월까지 1년간 보존처리를 실시하고 고분 내에 서식하는 조류의 제거 및 고분 내 습기 및 결로현상 제거를 위한 공기조화시설 등의 연구를 진행하였다(Suh *et al.*, 1998). 송산리고분군 2차 종합정밀조사에서는 1999년 보수공사 전후의 고분 내외부 현황 대비분석, 고분군 누수여부, 고분군 구조거동 및 안정상태 예측, 고분군 주변 환경 상시모니터링, 고분 내 남조류 제거후의 생태계 변화 등에 관한 연구를 실시하였다(Suh *et al.*, 2000).

미생물의 성장으로 인한 고분 또는 동굴 벽화에 대한 피해는 우리나라뿐만 아니라 일본과 프랑스에서도 발생하였

으며 특히 프랑스의 라스코벽화에서는 2001년부터 계속적인 곰팡이의 발생으로 인해 물리적인 세척과 함께 새로운 살생물제를 처리하여 곰팡이를 제거하려는 시도가 이루어지고 있다(Bastian, F. *et al.*, 2010). 고분 또는 동굴과 같은 밀폐된 조건 하에서 미생물의 생장은 번식함과 동시에 제어와 관리에 많은 어려움이 있으며 그 보존대책 방안의 마련도 시급하다. 따라서 본 연구에서는 고분 내 부유 미생물을 포집하고 벽체에 존재하는 미생물 동정을 통해 향후 발생 가능성이 있는 생물피해를 예측하고자 한다. 또한 고분 내 온습도 및 표면온도 변화 조사를 통해 공조기 가동이 고분 내 보존환경에 미치는 영향을 평가하고 향후 생물피해 발생을 제어하기 위한 보존환경 설정을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 온습도 환경

2.1.1. 온습도 조사

고분의 현실 내부에는 2004년 설치된 항온항습장치를 통해 18℃, 90%로 강제통풍을 실시하고 있었으나 6호분 현실에 대한 사진 기록화를 위하여 공조기 송풍구(duct)를 제거한 상태였다. 고분내 온습도 환경을 측정하기 위해 2010년 5월 12일부터 8월 16일까지 약 3개월간 온습도 측정계(Testo 177-H1, Testo 175-H2, Germany)를 1시간 단위 자동측정 조건으로 설정하여 6호분 및 무령왕릉 현실의 서측 벽면에 설치하였다.

2.1.2. 표면온도 측정

벽화표면에 결로현상을 예측하기 위해서 적외선 온도계(testo, 830-T2)를 사용하여 6호분과 무령왕릉 현실의 표면온도를 측정하였다. 동·서·남·북 방위별 벽체와 천정부를 아홉 개의 공간으로 나누어 측정하였다. 조사 기간 중 고분 내부의 사진촬영, 전기 공사 등이 진행되어 고분 내부에 설치된 공조기의 가동 및 정지된 경우가 있으며, 표면온도 측정의 경우 직접 공조의 영향을 받을 수 있으므로 공조기의 운행 여부를 참고하였다(Table 1).

Table 1. Service condition of conditioning equipments.

Site	Date	1st (May 28)	2nd (Jul 13)	3rd (Aug 16)
	Tomb No.6		removing duct	operation
Royal Tomb of King Muryeong		operation	operation	not working

Table 2. Sampling sites of wall surface microbes.

No.	Sampling site	Color	Method
①	Tomb No.6	West (clay)	White
②		South (brick)	Orange
③		East (brick)	White
④		West (brick)	White
⑤		West (brick)	White
⑥	Royal tomb of King Muryeong	South (clay)	White
⑦		South (brick)	Gray
⑧		South (brick)	White
⑨		North (brick)	White
⑩		North (brick)	White
			NC membrane

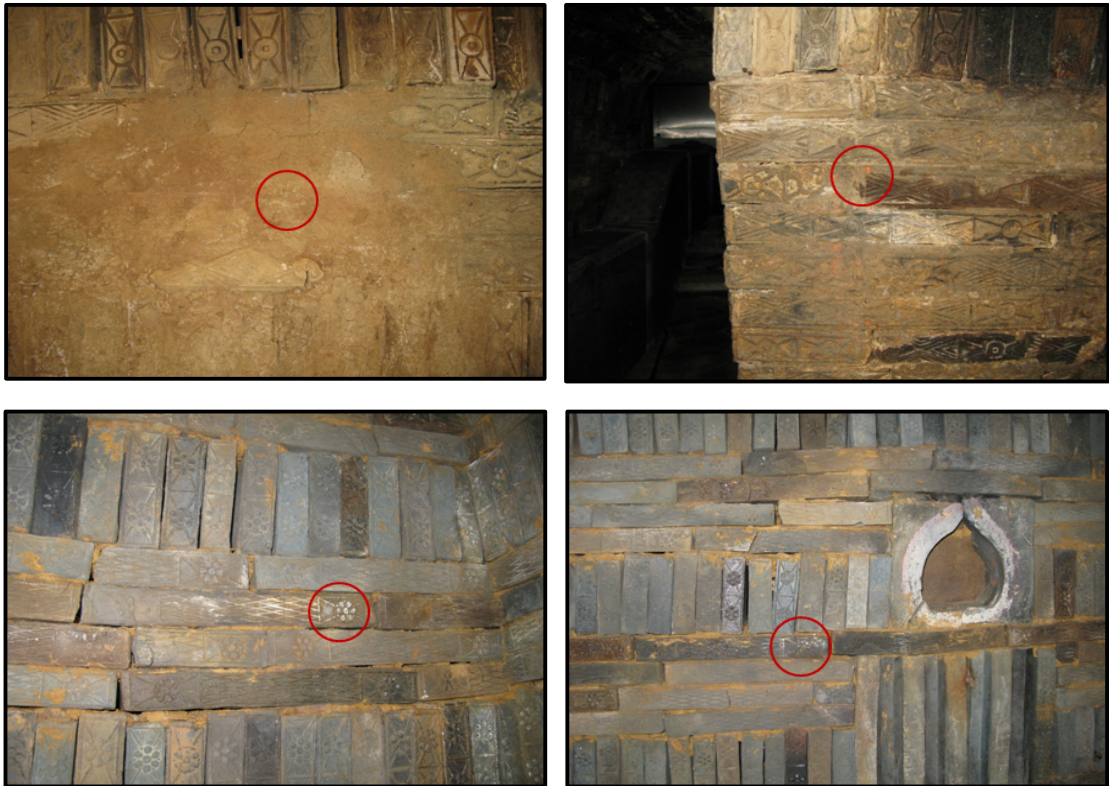


Figure 1. Sampling sites of wall surface microbes (top : Tomb No.6, bottom : Royal Tomb of King Muryeong).

Table 3. PCR conditions.

Step	Temperature	Time	Cycles
Pre-denaturation	94°C	10 min	1
Denaturation	94°C	45 sec	30
Annealing	55°C	45 sec	30
Extension	72°C	1 min	30
Final extension	72°C	10 min	1

2.2. 미생물 분포

2.2.1. 공기중부유균 포집

외부 환경과 고분 내부의 미생물 중 특성을 비교하기 위해 공기중 미생물 포집을 실시하였다. 송산리고분군 6호분 및 무령왕릉 현실 내부에서 공기포집기(BUCK, APB-708000, USA)를 사용하여 공기 250리터를 멸균된 TSA(Tryptone Soy Agar) 배지를 통과하도록 하여 각각 2회씩 포집하였다. 대조군으로는 고분 외부의 공기를 동일한 방법으로 여과하여 미생물을 포집하였다. 포집한 미생물은 28°C 배양기에서 4일간 배양하였다.

2.2.2. 표면오염균 채집

멸균된 Nitro cellulose(NC) 멤브레인과 멸균봉을 이용하여 고분의 벽체 표면으로부터 미생물을 채집하였다. 멸균수로 충분히 적신 NC 멤브레인을 벽화표면에 흡착시켜 10분 경과 후 수집하여 TSA 배지에 접종하였다. 벽체 표면이 균일하지 않아 멤브레인이 흡착되지 않는 경우에는 멸균봉을 이용하여 벽체 표면을 닦아내어 TSA 배지에 직접 도말하였다. 채집된 미생물은 28°C 미생물배양기에서 4일간 배양하였다. 채집 장소는 다음과 같다(Table 2, Figure 1).

2.2.3. 미생물 분류 및 동정

공기포집 및 벽체표면으로부터 채집한 미생물 중 배지 상에서 성장한 미생물의 균집(colony) 형태, 색상, 크기 등의 차이를 기준으로 단일집 분리(single colony)를 실시하였다. 곰팡이는 TSA 배지, 세균은 NA(Nutrient Agar)배지로 옮겨 28°C 미생물배양기에서 4일간 배양하였다. 2차 형태분류를 실시하여 단일 종으로 분리한 후 곰팡이는 18S rRNA region, 세균은 16S rRNA region의 염기서열 분석을 실시하였다. i-genomic BYF DNA Extraction Mini Kit(iNiRON)를 사용하여 gDNA를 추출하고 곰팡이는 ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')/

ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') primer, 세균은 27f(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3')/ 1492r(5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3') primer를 이용하여 선택영역을 증폭하였다(Table 3). 자동염기서열결정기(Automatic DNA sequencer; Perkin-Elmer)를 이용하여 염기서열을 분석하고 genebank(NCBI, National Center for Biotechnology Information)의 데이터베이스 BlastN Search 프로그램을 이용하여 동정하였다.

3. 연구결과

3.1. 온습도 환경

3.1.1. 온습도 조사

6호분 현실 일별 평균 온습도를 3개월간 조사한 결과 18.6~19.8°C, 습도는 94.3~99.9% 분포를 보이는 것을 확인하였다. 특히 고분 내부 사진 실측촬영을 위하여 제거하였던 송풍구(duct)를 재설치하는 공사가 진행된 7월 1일을 전후로 하여 습도의 변화폭이 크게 나타났다(Figure 2). 5월 13일부터 7월 1일 전까지의 현실내부 온도는 18.64~19.05°C, 습도는 97.07~99.9%로 거의 동일한 온습도를 유지하였다. Duct 공사를 완료한 이후 7월 2일부터 8월 13일까지 온도는 19.06~19.62°C, 습도는 94.25~98.11%로, 공조기가 가동할 경우 온도는 상승하고 습도는 줄어드는 양상을 보였다. 8월 14일 오전 이후로 습도가 99% 범위를 보임에 따라 공조기가 가동이 중지되었던 것으로 판단된다.

무령왕릉의 경우에는 3개월간 일별 평균온도 17.3~18.53°C, 상대습도 73.2~96.45% 분포를 나타내었다. 7월 13일 이후로 온도가 낮아지고 상대습도가 증가하는 양상을 보여 공조기의 가동여부에 변화가 생겼을 것으로 추정된다. 7월 13일 이전의 온도는 17.37~18.41°C, 상대습도 73.2~85.25%로 온도보다는 습도의 변화가 크게 나타났으며, 이는 강수량에 따른 외부 습도변화와 일정부분 유사성을 나타내었다. 7월 14일부터는 온도 17.32~17.69°C, 상대

습도 87.02~90.52%으로 유지되었으며 8월 14일부터 온도와 습도가 동시에 증가하는 것으로 보아 6호분과 동일하게 공조기의 가동이 중지된 것으로 추측된다.

3.1.2. 표면온도 측정

6호분 전들의 표면온도를 측정 결과, 1차 측정부터 2차 측정까지는 표면온도가 평균 19.0°C에서 16.7°C로 감소하다가 3차 측정 시 21.0°C로 증가하였다(Table 4). 공조기

운행과 관련하여 추측하였을 때 표면온도가 가장 낮은 것으로 확인되는 2차 측정의 경우에만 공조기가 운행되었으며, 3차 측정 시에는 공조를 통해 온도가 낮게 유지되던 것이 운행을 중지하면서 급격한 온도의 증가를 보인 것으로 판단된다. 방위별 온도변화를 비교할 경우, 송풍구가 제거된 1차 측정에서는 방위에 따른 차이가 나타나지 않았으나 송풍구를 설치하고 공조기가 가동되었던 2차 측정의 경우 온도는 평균적으로 동측면(17.9°C) > 서측면(17.2°C) > 남

Table 4. Results of dew point temperature.

Site	Date	1st (May 28)	2nd (Jul 13)	3rd (Aug 16)
		Temp.[°C]	19.0	19.6
Tomb No.6	Relative Humidity[%]	99.7	95.0	99.7
	Dew point[°C]	19.0	18.8	20.6
	Surface Temp.[°C]	19.0	16.7	21.0
Royal Tomb of King Muryeong	Temp.[°C]	17.8	18.0	19.6
	Relative Humidity[%]	80.4	84.3	95.7
	Dew point[°C]	14.4	15.3	18.9
	Surface Temp.[°C]	16.5	16.4	18.5

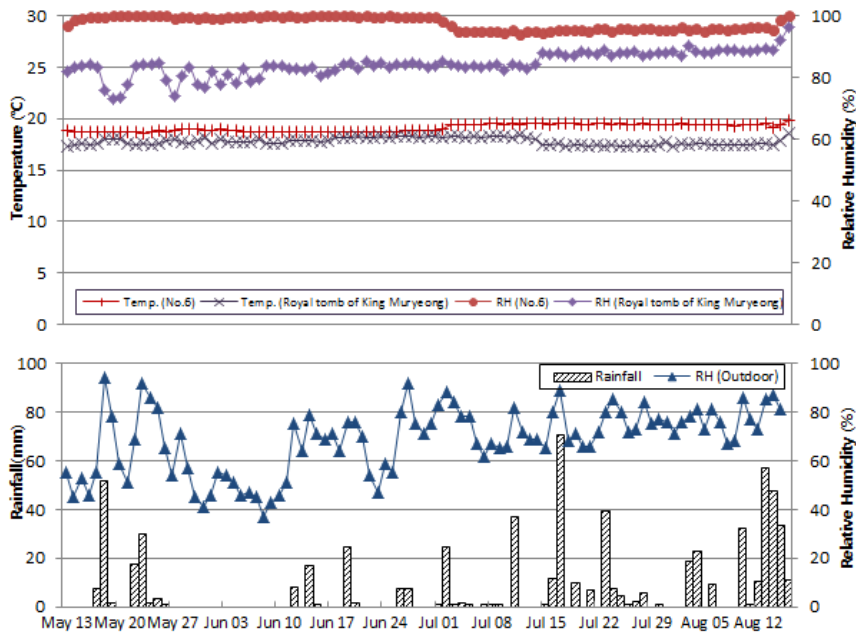


Figure 2. Relative humidity and temperature of burial room, and daily rainfall and relative humidity in Daejeon city(May-August 2010).

Table 5. Surface temperature and prediction of surface condensation - Tomb No.6.

Measuring point	Date	1st (May 28)			2nd (Jul 13)			3rd (Aug 16)		
		Left	Center	Right	Left	Center	Right	Left	Center	Right
East	Top	18.5	19.5	19.0	17.5	18.0	18.0	21.0	21.5	21.5
	Middle	18.5	19.5	19.5	17.5	18.5	18.0	21.0	21.5	21.5
	Bottom	18.5	19.0	19.0	17.5	18.5	17.5	21.0	21.0	20.5
West	Top	19.0	19.0	19.0	18.0	16.0	17.5	21.5	21.5	21.0
	Middle	19.5	19.5	18.5	18.0	16.0	17.5	21.0	21.0	21.0
	Bottom	19.0	19.0	18.5	18.0	16.0	17.5	21.0	20.5	20.5
South	Top	19.0	19.0	19.0	16.0	16.0	16.0	21.5	21.5	21.5
	Middle	19.5	19.5	19.5	15.5	17.0	15.5	21.0	21.5	21.0
	Bottom	19.0	Entrance	19.5	16.0	Entrance	15.5	20.0	Entrance	20.0
North	Top	18.5	19.0	19.0	14.5	14.5	15.0	21.0	21.0	21.0
	Middle	18.5	19.0	19.0	14.5	14.5	14.5	21.0	20.5	20.5
	Bottom	18.5	18.5	18.5	16.0	16.0	16.0	20.5	20.5	20.0
Ceiling	Top	-	-	-	18.0	16.5	18.0	20.5	21.5	21.0
	Middle	-	-	-	17.5	17.5	17.0	21.0	21.5	21.5
	Bottom	-	-	-	17.5	17.5	17.5	21.5	22.0	21.5
Note	Ground		-			21.0			19.5	
	Conditioning equipment		-			17.5			-	
	Burial room		19.5			20.9			19.0	

□ : Predicted point of dew condensation

Table 6. Surface temperature and prediction of surface condensation - Royal Tomb of King Muryeong.

Measuring point	Date	1st (May 28)			2nd (Jul 13)			3rd (Aug 16)		
		Left	Center	Right	Left	Center	Right	Left	Center	Right
East	Top	15.5	16.5	16.5	16.0	16.5	16.5	18.0	18.5	18.5
	Middle	15.5	16.5	16.5	16.0	16.0	16.0	18.0	18.5	18.5
	Bottom	15.5	15.5	16.0	16.0	16.0	16.0	18.0	18.5	18.5
West	Top	17.0	17.0	17.0	16.5	16.5	16.0	18.5	18.5	18.0
	Middle	17.0	16.0	17.0	16.0	16.0	16.0	18.5	18.5	18.5
	Bottom	15.5	15.5	16.5	16.0	16.0	15.5	18.5	18.5	18.0
South	Top	17.0	16.0	16.0	17.5	17.5	17.5	18.5	19.0	19.0
	Middle	16.5	16.5	16.5	17.0	17.0	17.0	18.5	19.0	18.5
	Bottom	16.0	Entrance	15.0	15.5	Entrance	16.0	18.0	Entrance	18.5
North	Top	16.5	17.0	16.5	15.5	16.0	16.5	18.5	18.5	18.0
	Middle	16.5	17.0	17.0	15.5	16.0	16.5	18.5	18.5	18.0
	Bottom	16.0	16.5	17.0	15.5	15.5	16.5	18.0	18.5	18.0
Ceiling	Top	17.0	17.5	17.0	16.5	17.5	16.5	18.5	19.0	18.5
	Middle	17.0	18.0	17.5	16.5	17.5	16.5	18.5	19.0	18.5
	Bottom	17.5	17.5	17.0	17.5	17.5	17.0	19.0	19.5	19.0
Note	Ground		-			15.5			18.5	
	Conditioning equipment 1		-			19.0			19.8	
	Conditioning equipment 2		-			18.9			19.8	
	Burial room		16.4			17.2			20.9	

□ : Predicted point of dew condensation

Table 7. Distribution of air borne microorganisms.

Collection sites	Colony counts (CFUs)			Morphological classification (Species)		
	Fungi	Bacteria	Total	Fungi	Bacteria	Total
Outdoor	113	18	121	5	4	9
Tomb No.6	7	47	54	7	6	13
Royal Tomb of King Muryeong	9	30	39	3	8	11

Table 8. Distribution of wall surface microorganisms.

No.	Sampling site	Morphological classification (Species)			
		Fungi	Bacteria	Total	
①	Tomb No.6	West (clay)	0	0	0
②		South (brick)	1	1	2
③		East (brick)	1	2	3
④		West (brick)	0	3	3
⑤	Royal tomb of King Muryeong	West (brick)	0	0	0
⑥		South (clay)	1	3	4
⑦		South (brick)	1	4	5
⑧		South (brick)	1	1	2
⑨		North (brick)	0	0	0
⑩		North (brick)	1	4	5

측면(15.9℃) > 북측면(15.1℃) 순으로 온도가 낮은 것을 볼 수 있다. 그러나 3차 측정 시 다시 뚜렷한 방위별 온도차가 발생하지 않는 것으로 보아 2차 측정에서 나타났던 방위에 따른 표면온도의 차이는 송풍구를 통해 현실로 들어오는 바람의 방향과 기류가 벽체 온도 차이를 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 1차 및 2차 측정 시기에는 전체적으로 표면 결로가 예상되었으나 3차 측정 시기에는 결로 예상지점이 각 방위별 바닥면으로 제한되는 것을 확인하였다(Table 5). 이는 여름철에는 외기상의 영향에 따라 천정면보다 바닥면의 표면온도가 더 낮기 때문이며 이러한 결과를 통해 계절별로 결로 예측 지점이 변화할 수 있을 것으로 추정된다. 실제 3차 조사 당시에 북측벽에서 결로를 확인하였으며 연도부위에 다량의 결로가 발생하였다.

무령왕릉의 표면온도 측정 결과, 현실의 온도와 상대습도 모두 점점 증가하는 양상을 보였으며, 표면온도의 경우 1차와 2차 측정값이 유사하다가 3차 측정에서 1.6℃ 가량 증가하였다. 방위에 따른 온도차이는 모든 측정시기에서 0.5~2℃ 차로 유지되고 있었다. 1차 및 2차 측정에서는 결로 발생이 예상되지 않았으며, 3차 측정 시기에 전체적으로 결로가 발생할 것으로 예측되었다(Table 6). 특히, 6호분과 동일하게 바닥면을 위주로 결로 발생이 예측되었다.

3.2. 미생물 분포

3.2.1. 부유미생물 분포

외부는 곰팡이 113개체, 세균 18개체로 곰팡이의 분포가 훨씬 높게 나타났다(Table 7). 반면에 6호분과 무령왕릉 현실에서는 곰팡이보다 세균의 개체수가 더욱 높게 나타났다. 고분 내부로 통하는 여러 개의 문과 통로를 통해 외부 공기의 유입을 막아주고 있기 때문에 외부에 비해 곰팡이의 개체수가 더욱 적은 것으로 판단된다. 특히 세균의 경우 현실 내부의 토양에 존재하는 토양미생물로 인하여 외부에 비해 개체수가 많은 것으로 확인되었다. 형태분류를 통해 확인된 곰팡이와 세균의 총 수에는 외부와 고분 내부 모두 유사한 양상을 나타내었다.

3.2.2. 벽체표면균 분포

6호분 서쪽 흙벽에서는 미생물이 확인되지 않았으며, 남쪽 전돌에서 곰팡이 1종, 세균 1종이 분리되었다(Table 8). 무령왕릉의 경우 방위별로 볼 때 동쪽에서 곰팡이 1종, 세균 2종, 서쪽에서 세균 3종, 남쪽에서 곰팡이 3종, 세균 8종, 북쪽에서 곰팡이 1종, 세균 4종이 분리되었다. 곰팡이 보다는 세균 개체수가 더 많이 확인되었으며, 이는 공기중 부유균 포집 결과와 일치하였다.

Table 9. Identification of isolated fungi.

Strain No.	Description	Identities	Accession	Phylum
ST-F-1	<i>Acremonium</i> sp.	547/547 (100%)	AY633563	Ascomycota
ST-F-2	<i>Alternaria brassicae</i>	565/569 (99%)	JF439435	Ascomycota
ST-F-3	<i>Arthrinium phaeospermum</i>	590/594 (99%)	KF144908	Ascomycota
ST-F-4	<i>Aspergillus carneus</i>	562/565 (99%)	HQ889708	Ascomycota
ST-F-5	<i>Aspergillus sydowii</i>	556/558 (99%)	AY373868	Ascomycota
ST-F-6	<i>Aspergillus versicolor</i>	558/558 (100%)	JN689347	Ascomycota
ST-F-7	<i>Cladosporium</i> sp.	540/541 (99%)	HQ846579	Ascomycota
ST-F-8	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	548/551 (99%)	HQ607983	Ascomycota
ST-F-9	<i>Epicoccum</i> sp.	538/539 (99%)	JF694747	Ascomycota
ST-F-10	<i>Epicoccum nigrum</i>	545/548 (99%)	JQ619839	Ascomycota
ST-F-11	<i>Engyodontium album</i>	595/600 (99%)	KC466550	Ascomycota
ST-F-12	<i>Fusarium oxysporum</i>	528/531 (99%)	EU839377	Ascomycota
ST-F-13	<i>Fusarium solani</i>	556/557 (99%)	JF912885	Ascomycota
ST-F-14	<i>Paraconiothyrium brasiliense</i>	554/554 (100%)	JQ936270	Ascomycota
ST-F-15	<i>Penicillium chrysogenum</i>	572/574 (99%)	KC009826	Ascomycota
ST-F-16	<i>Penicillium meleagrinum</i>	585/590 (99%)	HM469412	Ascomycota
ST-F-17	<i>Penicillium steckii</i>	592/597 (99%)	HM469415	Ascomycota
ST-F-18	<i>Penicillium vinaceum</i>	576/581 (99%)	EU833227	Ascomycota
ST-F-19	<i>Prostheccium</i> sp.	534/536 (99%)	KF367475	Ascomycota
ST-F-20	<i>Stagonospora</i> sp.	558/572 (98%)	EU009968	Ascomycota

Table 10. Identification of isolated bacteria.

Strain No.	Description	Identities	Accession	Phylum
ST-B-1	<i>Arthrobacter agilis</i>	1427/1431 (99%)	KC354457	Actinobacteria
ST-B-2	<i>Arthrobacter oxydans</i>	1420/1432 (99%)	JN377644	Actinobacteria
ST-B-3	<i>Bacillus</i> sp.	1456/1459 (99%)	HM104462	Firmicutes
ST-B-4	<i>Bacillus</i> sp.	1450/1458 (99%)	KC236525	Firmicutes
ST-B-5	<i>Bacillus</i> sp.	1431/1433 (99%)	JX134465	Firmicutes
ST-B-6	<i>Bacillus</i> sp.	1423/1425 (99%)	GQ927164	Firmicutes
ST-B-7	<i>Bacillus firmus</i>	1450/1456 (99%)	JN244990	Firmicutes
ST-B-8	<i>Bacillus idrensis</i>	1378/1435 (96%)	JF411294	Firmicutes
ST-B-9	<i>Bacillus megaterium</i>	1453/1458 (99%)	DQ105968	Firmicutes
ST-B-10	<i>Bacillus simplex</i>	1439/1440 (99%)	JN540797	Firmicutes
ST-B-11	<i>Deinococcus ficus</i>	1395/1399 (99%)	JN082273	Deinococcus-Thermus
ST-B-12	<i>Leifsonia</i> sp.	1418/1427 (99%)	AB244292	Actinobacteria
ST-B-13	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	1445/1446 (99%)	AB244482	Firmicutes
ST-B-14	<i>Massilia</i> sp.	1422/1428 (99%)	FR865956	Proteobacteria
ST-B-15	<i>Micrococcus luteus</i>	1409/1413 (99%)	EU379295	Actinobacteria
ST-B-16	<i>Paenibacillus xylanilyticus</i>	1444/1454 (99%)	HQ285772	Firmicutes
ST-B-17	<i>Sphingomonas aerolata</i>	1380/1382 (99%)	FR691420	Proteobacteria
ST-B-18	<i>Staphylococcus petrasii</i>	1441/1447 (99%)	JX139856	Firmicutes
ST-B-19	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	1442/1446 (99%)	AP008934	Firmicutes

Table 11. Fungal distribution according to the collecting sites.

Species	Collection site	Tomb No.6			Royal Tomb of King Muryeong				
		A	W	S	A	E	W	S	N
<i>Acremonium</i> sp.		○				○		○	○
<i>Alternaria brassicae</i>		○							
<i>Arthrimum phaeospermum</i>					○				
<i>Aspergillus carneus</i>									○
<i>Aspergillus sydowii</i>					○				○
<i>Aspergillus versicolor</i>		○							○
<i>Cladosporium</i> sp.		○							
<i>Cladosporium cladosporioides</i>		○							
<i>Epicoccum</i> sp.		○							
<i>Epicoccum nigrum</i>					○				
<i>Engyodontium album</i>			○		○				
<i>Fusarium oxysporum</i>		○							
<i>Fusarium solani</i>								○	
<i>Paraconiothyrium brasiliense</i>					○				
<i>Penicillium chrysogenum</i>								○	
<i>Penicillium meleagrinum</i>		○							
<i>Penicillium steckii</i>		○							
<i>Penicillium vinaceum</i>		○							
<i>Prosthecium</i> sp.		○							
<i>Stagonospora</i> sp.		○							

Table 12. Bacterial distribution according to the collecting sites.

Species	Collection site	Tomb No.6			Royal Tomb of King Muryeong				
		A*	W	S	A	E	W	S	N
<i>Arthrobacter agilis</i>		○							
<i>Arthrobacter oxydans</i>		○			○				
<i>Bacillus</i> sp.					○				
<i>Bacillus</i> sp.		○							
<i>Bacillus</i> sp.									○
<i>Bacillus</i> sp.		○			○			○	
<i>Bacillus firmus</i>					○				
<i>Bacillus idrensis</i>						○	○	○	○
<i>Bacillus megaterium</i>		○					○		
<i>Bacillus simplex</i>		○	○				○	○	○
<i>Deinococcus ficus</i>					○				
<i>Leifsonia</i> sp.					○				
<i>Lysinibacillus sphaericus</i>		○						○	
<i>Massilia</i> sp.					○				
<i>Micrococcus luteus</i>		○							○
<i>Paenibacillus xylanilyticus</i>					○				
<i>Sphingomonas aerolata</i>		○							
<i>Staphylococcus petrasii</i>		○			○				
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>		○							

*A: Air-borne collection, E: East wall, W: West wall, S: South wall, N: North wall

3.2.3. 미생물의 형태분류 및 종동정

공기중부유균 포집을 통해 곰팡이 14종, 세균 17종으로 1차 분류하였다. 벽체 표면에서는 곰팡이 6종, 세균 8종을 분류하였다. 형태 분류된 종에 대한 유전자 분석을 실시한 결과 총 곰팡이 20종, 세균 19종으로 확인되었다(Table 9, 10). 곰팡이 20종은 모두 자낭균류로 분류되며, 세균은 Actinobacteria 4종, Firmicutes 12종, Proteobacteria 2종, Deniocooccus-Thermus 1종으로 분류된다.

포집위치에 따른 분포는 6호분의 경우 곰팡이 12종, 세균 11종이 공기포집을 통해 확인되었고, 서벽 표면에서 곰팡이 1종(*Engyodontium album*), 세균 1종(*Bacillus simplex*) 이 동정되었다(Table 11, 12). 특히 벽체의 포집 위치가 서벽과 남벽에 한정되어 있으므로 공기중 및 벽면에서 확인되는 곰팡이와 세균의 유사성은 확인되지 않았다. 무령왕릉에서는 곰팡이 5종, 세균 9종이 공기중에서 확인되었고, 벽체 표면의 경우 곰팡이 6종, 세균 7종이 분리되었다. 곰팡이와 세균 모두 주로 남측 및 북측 벽면에서 더 많은 미생물을 확인하였으며 이는 출입구로 시작해 외부공기가 직접적으로 닿는 위치이기 때문일 것으로 추측된다.

4. 결론

송산리고분군 내부에 설치된 제습기의 고장으로 인하여 납조류가 발생하게 됨에 따라 고분 현황에 맞는 새로운 공기조화시스템에 대한 연구가 진행되었다(Lee, 1997). 따라서 연구를 수행한 2010년 당시에는 전실에 향온습습장치가 설치되어 있고 송풍구를 통하여 고분 내 현실로 공기를 순환시키는 방법으로 온·습도를 조절하고 있었다.

2010년 5월 12일부터 8월 16일까지 약 3개월간 고분 내부의 온습도 측정을 실시한 결과, 6호분은 고분 내 공조시스템의 가동 여부에 따라서 1.79~2.82%의 비교적 적은 습도변화를 보였다. 무령왕릉은 공조기가 가동되는 동안에도 10% 이상의 높은 습도변화를 나타내었으며, 공조기의 가동이 중지되면서 그 폭이 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 이는 모형고분 내부를 공조기 작동 없이 자연 상태로 두었을 때의 상대습도가 77~100%까지 유동적으로 변화하며 외기온도나 일기에 따라 다소 영향을 받는다는 결과와 일치하였다(Lee K.B. *et al.*, 2003). 표면온도 측정에서는 외부온도가 높아지면 결로는 바닥면과 북측방향에 집중적으로 나타났으며, 다른 부분에 비해 상대적으로 온도가 낮은 지역에 한해 부분적으로 발생하는 것을 확인하였다(Lee Y.S., 2002). 특히 6호분의 경우 공조기가 가동 중

일 때 송풍구로부터 불어오는 바람의 방향에 의해 각 방위의 벽체에서 크기는 2.8℃까지 온도차가 나타남에 따라 고분내 기류가 벽체 및 벽화에 직접적으로 영향을 주고 있는 것을 확인하였다.

공기중 및 벽체 표면으로부터 곰팡이 20종, 세균 19종을 분리 동정하였다. *Alternaria* sp., *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. 등의 곰팡이와 *Pseudomonas* sp., *Arthrobacter* sp. 등의 토양생식균이 벽화 표면에서 주로 발견된다는 결과와 동일하였다(Ciferri, O., 1999). 특히 *Fusarium* sp.는 프랑스의 라스코 동굴벽화 및 일본의 기토라 고분과 다마스고분에서도 발견되었으므로(Dupont, J. *et al.*, 2007; Kigawa, R. *et al.*, 2010) 고분 및 동굴 내부에 조성된 고습, 저온의 환경에서도 충분히 성장할 수 있는 것으로 확인된다. 포집위치에 따라 비교할 경우 벽체 표면에 비해 공기중으로부터 더욱 다양한 곰팡이와 세균이 존재하는 것으로 확인되었으며, 두 공간 사이의 균주에 대한 유사성이 낮은 것으로 나타났다.

현재 국내에 설치된 공조시설은 고분의 물리적인 특징과 대기 유동 조건 등 다양한 변수를 고려하지 못하고 일반적인 공조시설에 준하는 수준으로 시공되어 있는 경우가 대부분이며, 이를 보완하기 위해 실내기 설치 공조시스템 및 덕트형 공조시스템의 적용가능성 및 정적 온습도 조건 산출에 대한 연구가 진행되어 왔으나(Jun *et al.*, 2006) 장기적인 운행에 따른 운전상태의 검증 및 모니터링에 대한 연구가 부족하다(Park *et al.*, 2007). 또한 고분 내부에 존재하는 미생물의 활동에 의해 원형 손상 등의 문제가 발생할 수 있으므로(McNamara, C.J. *et al.*, 2006) 고분 내 미생물 분포 비교를 통한 장기적인 미생물 성장 가능성을 예측하고 고분 내 미시환경 조건이 벽화의 손상에 미치는 영향에 대한 종합적인 연구를 통해 고분의 장기적인 보존방안 대책이 시급히 요구된다.

사 사

이 연구는 2011~2012년도 공주시의 연구용역사업인 “공주 송산리 고분벽화 보존방안 연구”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Bastian, F., Jurado, V., Novakova, A., Alabouvette, C. and Saiz-Jimenez, C., 2010, The microbiology of Lascaux

- Cave. *Journal of Microbiology*, 156, 644-652.
- Ciferri, O., 1999, Microbial degradation of paintings. *Journal of Environmental Microbiology*, 65(3), 879-885.
- Dupont, J., Jacquet, C., Denetiere, B., Lacoste, S., Boust, F., Oriol, G., Gruaud, C., Couloux, A. and Roquebert, M.F., 2007, Invasion of the french paleolithic painted cave of lascaux by members of the *Fusarium solani* species complex. *Micologia*, 99(4), 526-533.
- Hwang C.K., 2001, Restoration techniques of the modern oil paintings- based on lining method. M. S. Thesis. Hanseo University, Seosan, Korea. (in Korean with English abstract)
- Jang E.H., 2002, A study on the comparison between traditional and modern materials used for conservation of the surface of clay wall painting. M. S. Thesis. Yongin University, Yongin, Korea. (in Korean with English abstract)
- Jun Y.D., Lee K.B., Jun H.H., Ko S.B., Park J.Y. and Youn Y.M., 2006, Operation characteristics of the HVAC system installed in ancient tomb. *Journal of Energy Engineering*, 15(3), 202-208. (in Korean with English abstract)
- Kigawa, R., Sano, C., Kiyuna, T., Tazato, N. and Sugiyama, J., 2010, Use of ethanol and isopropanol as carbon sources by microorganisms isolated from Takamatsuzuka and Kitora tumuli. *Journal of Conservation Science*, 49, 231-238. (in Japanese with English abstract)
- Lee K.B., 1997, Research of the optimum air conditioning system on the Songsanri tomb site. *Journal of Industrial Technology*, 5, 51-72. (in Korean)
- Lee K.B., Jun Y.D., Ko S.B. and Kim H.G., 2003, Performance of an HVAC system for the conservation of ancient tombs during winter season. *Journal of Industrial Technology*, 11, 183-189. (in Korean with English abstract)
- Lee Y.S., 2002, A study on the criterion and confrontation strategy on the phenomenon of dew condensation at the wall surface. M. S. Thesis. Seoul National University of Technology, Seoul, Korea. (in Korean with English abstract)
- McNamara, C.J., Perry, T.D., Bearce, K.A., Hamandez-Dugue, G. and Mitchell, R., 2006, Epilithic and endolithic bacterial communities in limestone from a Maya archaeological site. *Journal of Microbial ecology*, 51(1), 51-64.
- Park J.Y., Ko S.H., Jun H.H., Jun Y.D and Lee K.B., 2007, A study on the performance and dehumidification load of an HVAC system for conservation of ancient tombs. *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, 19(3), 253-262.
- Röllerke, S., Witte, A., Wanner, G. and Lubitz, W., 1998, Medieval wall painting- a habitat for archaea: identification of archaea by denaturing gradient gel electrophoresis(DGGE) of PCR amplified gene fragments coding 16S rRNA in a medieval wall painting. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 41, 85-92.
- Suh M.C., Lee N.S., Choi S.W., Kim G.H., Jeong S.M. and Lee K.B., 1998, In-situ status and conservational strategy of the Muryong royal tomb, the Songsanri tomb No.5 and the Songsanri tomb No.6 of Baekje dynasty. *The Journal of Natural Science*, 7, 147-161. (in Korean with English abstract)
- Suh M.C. Choi S.W., Lee N.S., Kim G.H., Koo M.H., Kang J.M. and Lee W.J., 2000, Conservation state of the Songsanri tomb site. Kongju University, Kongju, Korea. (in Korean)