고령 고아리 벽화고분의 보존환경 연구

정선헌 | 이현주 | 이민영* | 정용재¹

한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과,
*한국전통문화대학교 문화재예방보존연구소

Conservation Environment for Mural Tomb in Goa-ri, Goryeong

Seon Hye Jeong | Hyun Ju Lee | Min Young Lee* | Yong Jae Chung¹

Department of Heritage Conservation & Restoration, Graduate School of Cultural Heritage,
Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 33115, Korea

*Institute of Preventive Conservation for Cultural Property, Korea National University of
Cultural Heritage, Buyeo, 33115, Korea

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

초록 본 연구는 가야시대 고분인 고령 고아리 벽화고분을 대상으로 하였다. 고분의 보존환경 연구를 위해 고분의 환경(온습도, 표면온도, 결로)과 생물(미생물 분포) 모니터링을 1년간 실시하였다. 그 결과, 고분 내외부의 연평균 온도차는 11.7°C로 확인되었고 고분 내부의 온도는 외부 온도와 1~2개월 격차로 변화되고 있었다. 고분 내 최고 온도는 9월, 최저 온도는 3월이었고 상대습도는 약 100%로 유지되었다. 결로의 경우 벽화가 그려진 고분 현실의 천장에는 4월부터 12월까지 결로가 발생하였고, 연도 천장에는 1년 내내 결로가 발생하였다. 고분 내부와 벽체 표면에서는 미생물이 분리·배양되어 미생물 생장에 적합한 환경이 조성되면 생장가능 할 것으로 판단된다. 따라서 미생물 생장 온도 조건을 기준으로 미생물 발생 위험 예측도를 작성하였고 8월부터 10월이 위험 기간으로 확인되었다.

중심어: 고령 고아리 벽화고분, 보존환경, 표면 결로, 벽체 미생물, 손상 위험기간

ABSTRACT This study focused on the Gaya mural tomb located in Goa-ri, Goryeong-gun, North Gyeongsang Province, Republic of Korea. Environmental factors such as ambient temperature, relative humidity and surface temperature, and microbial distribution on mural tombs were monitored for one year to gather data on the conservation environment of the mural tombs. The average internal temperature difference with reference to the ambient outer temperature was observed to be 11.7°C for the monitoring period and the internal temperature of the tomb was found to change periodically every one or two months in response to the outer temperature. The highest temperature was observed in September and the lowest in March. The relative humidity in the mural tomb remained constant at 100%. Between December and April, condensation occurred on the ceiling of the main room of the tomb, where the murals are located. On the ceiling of the aisle, the condensation occurred throughout the year. The inside and surface wall were isolated from microorganisms, which could grow when a suitable growth environment suitable is established. Based on microbial growth temperature conditions, risk periods of microbial hazards were established, where in the period from August to October was identified as the most dangerous.

Key Words: Mural painting of Goa-ri tomb in Goryeong, Conservation environment, Surface condensation, Surface micro-organisms, Risk period of damage

1. 서론

고분은 죽은 사람을 매장한 곳이며서 그 당시의 사회가 죽음을 표현한 것을 상징적으로 보여주는 것이다. 고분은 자연환경에 직접적인 영향을 받지만 그 당시 사회의 죽음에 대한 인식이나 문화적 차이에 따라 다른 형태로 나타난다. 또한 고분은 피장자의 사회적 위치를 나타내며 피장자가 속해 있던 사회나 집단의 종교와 신앙도 반영한다. 고분을 거대하게 축조하거나 고분 내에 여러 시설을 마련하기도 하고, 화려한 벽화를 무덤 내부에 그려 넣기도 하였다(Jung, 2009).

삼국시대 고분 벽화는 일반적으로 당시 생활 풍속이나 장식적인 무늬, 사신 등을 그려 넣었다. 이러한 벽화는 삼국시대 중에서도 고구려에 집중적으로 조성되었고 백제와 신라에서는 그 개체수가 매우 적다. 삼국 시대의 벽화 고분 중 남쪽에 위치한 고분은 총 5기이다. 이 중 백제 고분은 공주 송산리 6호분(사적 제13호), 부여 능산리 1호분(사적 제14호), 신라 고분은 영주 순흥 벽화 고분(사적 제313호)과 영주 순흥 어숙묘(사적 제238호), 가야 고분으로 고령 고아리 벽화고분(사적 제165호)이 존재한다. 벽화 고분은 그림이 존재한다는 특성상 역사적, 미학적으로 그 중요성이 매우 높다.

고분은 구조적인 특성상 외부와 차단된 별도의 공간으로 이루어지고 매장 환경과 유사한 저온고습의 환경 조건을 유지하고 있다. 고분의 발굴 등에 의해 외부 공기가 유입되면 고분 내부의 자연적인 환경 조건을 변화시켜 온도 차에 의한 결로현상, 외부에서 유입된 미생물의 생장 등 심각한 문제가 발생할 수 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2007).

프랑스 라스코 동굴 벽화는 1948년 관람객에게 공개되었으나 녹색의 생물체가 발견됨에 따라 1963년 폐쇄되었다. 이는 *Chlorococcales* 속의 *Bracteacoccus minor*로, 이외에도 시아노박테리아, 세균, 곰팡이 등이 발생하였고, 이에 대한 즉각적인 보존처리를 실시 후 현재까지 모니터링을 하고 있다(Ciferri, 1999). 스페인 알타미라 동굴 벽화 또한 1879년 발견된 이래로 공개와 폐쇄를 반복하였고, 2002년 이후 완전 폐쇄조치 후 현재 벽화 일부분에 한해서 인원과 시간의 제한을 두고 공개한 상태이다. 보존관리를 위해 미생물 발생에 대한 모니터링을 실시하였고, 표면에 형성된 흰색·황색·회색의 생물체에 대한 미생물 동정 및 대사물질 분석 결과의 레퍼런스를 제작하였다(Portillo *et al.*, 2007; 2009). 일본의 다카마쓰즈카고분 벽화는 1972년 발

견되었고, 1976년 보존시설을 준공하여 관리하였으나 곰팡이 발생으로 인해 2007년 석실해체작업을 진행하였다(Kang, 2012). 기토라고분 벽화 또한 1983년에 발견되었으나 벽화의 안정성 문제로 2004년부터 벽화 해체를 진행하였고, 2010년에 완료하였다(Kang, 2013).

공주 송산리 고분군은 누수현상으로 인해 전실 내부에 *Lynhbya* spp.와 *Gloeocapsa* spp. 남조류가 발생하여 보존 처리를 하였고, 벽화가 있는 6호분은 공기 조화 설비로 인한 건조, 균열, 탈락 등의 현상이 보고된 바 있다(Chung *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2014). 이후 내부 공조 시스템 가동을 중단하고 지속적인 모니터링을 통해 송산리 6호분에 적합한 공기조화설비 및 공간계획수립에 대한 결과들을 제안하였다(Kim *et al.*, 2016).

가야의 유일한 벽화고분인 고령 고아리 벽화고분은 1963년 발견된 이래로, 3차에 걸친 보수 공사가 진행되었다. 2차 보수시 시멘트로 출입구를 만들고 문을 설치하여 출입을 가능하게 하였고, 봉토를 높였다. 봉토의 중압으로 인한 고분 내부 석실의 균열과 벽면에 부착된 회가 탈락하였다. 또한 출입에 따른 외부 공기의 유입으로 인해 결로 현상 등으로 인해 벽화가 퇴색되어 형태를 알아보기 어려워졌다. 이후 3차 보수 공사를 진행하며 실측 및 봉분 층위 조사, 벽화 모사 작업등을 진행하였다. 그러나 현재까지 벽화의 손상은 더 진행된 상태이며, 고분 내부의 환경에 대한 정확한 정보가 없는 상태이다. 이에 본 연구는 고분의 환경을 분석하고 그에 따른 보존 방안 수립을 위한 모니터링을 실시하였다. 또한 공간 내부의 미생물 분포 조사를 실시하여 고분의 종합적인 보존환경 계획을 제시하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 고령 고아리 벽화고분

고령 고아리 벽화고분은 천정에 연화문이 있는 가야의 벽화고분으로, 사적 제165호로 지정되었다. 고분은 구조 형식으로 미루어보아 대가야 시기인 6세기 초·중반에 축조된 것으로 추정되며, 현실 내에 위치한 2기의 관대를 통해 추가장 됐을 것으로 판단되고 있다(Cho, 2008). 고분은 현실과 연도로 구성되어있고, 현실은 남북측이 긴 장방형 평면이고, 연도는 현실 남북의 동쪽에 위치하는 가야시대 횡혈식석실묘이다(Figure 1).

1963년 2월 5일자 기사로 고분의 존재가 보고되었고(Kim, 1964), 10월에 발견되어 조사가 진행되었고 1964년

1차 보수를 하였다. 이후 1977년 출입구를 만들고 봉분을 덧쌓아 올리는 2차 보수 공사를 하였다. 공사 이후의 출입, 공간 환경차이에 따른 벽화 손상, 보수로 인한 봉토 압력 발생 등의 문제로 1984년 이에 대한 3차 보수 공사를 진행하였다(Jung, 2014). 현재는 벽화와 고분의 보존을 위해 폐쇄한 상태이다.

1964년 보고에 따르면 벽화는 현실과 연도의 천정석에 연화문이 뚜렷했고, 현실 남벽 상부에 곡선 같은 자국과 연도측벽하부에 당초와 유사한 문양의 흔적이 있었다. 또한 벽화는 적색, 녹색, 갈색의 3색을 써서 그렸다(Kim, 1964). 이후 안료 분석 당시 내부 벽화 상태는 현실과 연도 천정에 일부 남아있고, 원형 확인이 어려우며, 측면의 회가 물기를 머금어 푸석푸석한 상태라고 보고된 바 있다(Moon *et al.*, 2002). 2012년부터 2013년까지 고령 고아리 벽화 고분 상

태조사 결과에 따르면 현실과 연도 천장에 연화문의 벽화는 남아있지만 이전에 도상들 대비 손상이 진행된 상태이며, 다른 벽면에서 일부 극미량의 채색 자국만이 확인되고 대부분 마감층이 박락되고 유실된 상태였다(Lee *et al.*, 2015).

2.2. 고분 환경 모니터링

안정적 환경 유지를 위해 상시 출입이 어려운 고분의 특성과 고습한 특수 환경으로 인해 자동계측시스템을 고분 내·외부에 구축하였다(Figure 2). 고분 내부 공간에 따른 온도 및 상대습도를 확인하고자 온·습도센서(HMP155, Vaisala, Finland)를 현실과 연도에 배치하였다. 또한 위치에 따른 표면온도의 차이를 보기 위해 현실의 북측, 남측,

Figure 1. Current condition of internal mural tomb in Goa-ri, Goryeong(Starting from the left - the view of aisle, aisle ceiling, south side of main room, main room ceiling are located).

Figure 2. Environment monitoring system of mural tomb in Goa-ri, Goryeong(Starting from the left. Temperature and humidity measuring system, surface temperature measuring system, external environment AWS are located inside the main room).

천장, 바닥, 연도의 천장과 바닥에 표면온도센서(DTS12G, Vaisala, Finland)를 천연찰흙을 이용하여 설치하였다. 외부 환경이 고분 내부 환경에 미치는 영향을 확인하기 위해 온습도 측정용 멀티센서(WXT520, Vaisala, Finland)를 봉분 상부에 설치하였다. 실시간으로 측정되는 데이터는 무선으로 110 m 거리에 위치한 상무사 기념관의 컴퓨터에 10분 간격으로 자동 저장된다. 저장된 데이터는 실시간 원격 프로그램을 이용, 다운로드하여 환경 분석을 하였다.

2.3. 표면온도 및 결로 모니터링

계절별 표면온도 변화는 적외선온도계(Testo 845, Testo, Germany)를 이용하여 표면온도를 0.1℃ 단위로 측정하였다. 측정 대상은 동·서·남·북면과 천장·바닥면으로 총 6개의 면을 측정하였고, 현실과 연도 모두 측정하였다. 측정일시는 계절별로 비교하기 위해 봄철(4월), 여름철(7월), 가을철(10월), 겨울철(1월)로 1일씩 조사를 실시하였다.

2.4. 미생물 분포 조사

미생물 분포 조사는 2012년 10월(1차), 2013년 4월(2차)로 총 2회 실시하였다. 멸균봉을 이용하여 고분의 벽체 표면 미생물을 채집하였고 채집 위치는 Figure 3과 같다. 채집한 미생물은 PDA(Potato Dextrose Agar, Difco, USA) 배지에 직접 도말한 후 28℃ 배양기에서 3~5일간 배양하였다. 배양된 미생물은 미생물의 형태학적 차이를 기준으로

단군집 분리(single colony)를 하였고, 곰팡이는 PDA 배지, 세균은 NA(Nutrient Agar, Difco, USA) 배지에 접종하여 분리·배양하였다. 이후 단일 종으로 분리된 미생물의 종을 확인하기 위해 염기서열 분석을 실시하였다. 미생물의 gDNA는 i-genomic BYF DNA Extraction Mini Kit(iNtRON)를 사용하여 추출하였고 곰팡이는 18S rRNA region, 세균은 16S rRNA region을 증폭하기 위해 PCR(Polymerase chain reaction)을 수행하였다. 곰팡이는 ITS1(5'-TCGCTAGGTGAACCTGCGG-3')/ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') primer, 세균은 27F(5'-AGAGTTTGTATCCTGGCTCAG-3')/1492F(5'-

Figure 3. Sites where surface microorganisms on wall inside mural tomb in Goa-ri, Goryeong sampled.

Figure 4. Average of monthly temperature in different spaces.

GGTTACCTTGTTACGACTT-3') primer를 사용하였다. 이 후 증폭된 PCR 산물은 전기 영동하여 DNA를 확인하였다. 염기서열 분석은 마크로젠(주)에 의뢰하였으며 결과는 genebank (NCBI, National Center for Biotechnology Information)의 데이터베이스 BlastN Search 프로그램을 이용하여 분석하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 공간별 온도 및 상대습도 비교

월별 고분 외부 및 현실 내부 온도를 비교한 결과, 현실의 연평균 온도는 16.0℃, 외부의 연평균 온도는 12.4℃로 확인되었다(Figure 4). 현실의 온도 범위는 10.43℃~22.06℃로 연간 최저·최고 온도 차이는 11.63℃로 확인되었다. 외부 온도는 -3.17℃~26.79℃로 연간 최저·최고 온도 차이는 29.96℃로 확인되었다. 또한 현실과 외부의 온도 차가 가장 높을 때는 1월로 15.36℃의 차이가 확인되었고, 온도 차이가 가장 낮을 때는 4월 1.08℃로 확인되었다. 고분 내부의 온도가 가장 낮은 달은 3월, 가장 높은 달은 9월이며, 외부의 온도가 가장 낮은 달은 1월, 가장 높은 달은 8월로 외부 환경 변화와 1~2달의 차이를 보였다. 또한 연도의 온도는 현실과 1℃ 내외의 차이를 보이며, 변화 경향은 유사하였다.

월별 현실 내부의 표면온도는 북벽, 남벽, 천장, 바닥을 측정하고 비교한 결과, 북벽과 남벽은 겨울철(12월, 1월, 2월)을 제외하고는 남벽이 북벽보다 높았다(Figure 5). 겨울철에 역전되는 양상을 보이지만 북벽·남벽의 표면온도의 전체적인 변화를 보면 두 벽 모두 현실의 공기 중 온도 변화와 유사하게 변하였다. 두 벽의 온도차이 또한 0.5℃ 정도로 크지 않은 것으로 확인되었다. 북벽의 연중 최저, 최고 온도 차이는 11.26℃, 남벽의 온도 차이는 11.37℃로 확인되었고, 상대적으로 연도와 외기에 노출된 남측면의 온도차이가 클 것으로 예상되었으나 현실 공간 내에서 큰 차이가 없었다.

천장의 경우, 여름철에 바닥보다 온도가 높았고, 겨울철에 낮아졌다. 천장과 바닥의 온도가 역전되는 시기는 12월과 5월로, 이러한 변화 요인은 고분을 덮고 있는 봉토에 의한 것으로 판단된다. 외부의 환경과 상대적으로 인접한 천장의 경우, 최저·최고 온도 차이는 12.85℃이고, 바닥의 경우 9.53℃로 천장과 바닥이 약 3.3℃의 차이가 있었다. 현실 내부의 표면온도 변화는 천장이 12.85℃로 가장 높고, 11.37℃의 남벽, 11.26℃의 북벽, 9.53℃의 바닥 순으로 낮아졌다.

고분 현실 천장과 바닥, 연도 천장과 바닥의 표면온도를 비교하였고, 현실과 연도의 위치에 따른 표면온도는 유사한 것으로 확인되었다(Figure 6). 여름철의 경우, 외부 환경의 영향을 크게 받는 천장의 온도가 현실, 연도 모두 바닥보다 높았고 겨울철은 바닥보다 낮았다. 고분 내부의 공기

Figure 5. Comparison of surface temperature by the location in main room.

중 온도가 가장 낮은 3월에 천장의 표면온도 또한 최저 온도(현실 9.38℃, 연도 9.84℃)를 기록하였고, 가장 높은 9월에도 최고 온도(현실 22.23℃, 연도 21.94℃)를 기록하였다. 고분 내부의 온도는 외부 환경의 영향을 받고, 그로 인해 변화가 발생하는 것이 확인되었다.

상대 습도의 경우, 현실과 연도 평균 습도는 약 100%로 연중 유지되고 있었다(Figure 7). 외부와 차단되어 있고 연중 밀폐되어 있으며, 온도 변화가 급격히 발생하지 않아서 공기 중에 있는 수증기량이 천천히 변하는 온도의 포화수증기량으로 맞춰짐에 따라 100%에 가까운 상대습도가 연중 유지되는 것으로 판단된다. 모니터링을 하는 동안 상대습도가 95% 이하로 떨어지지 않는 것으로 확인되었다.

3.2. 표면온도 및 결로 모니터링

외부 기온이 가장 낮은 겨울철과 달리 고분 내부는 봄철이 가장 낮은 것으로 확인되었다(Figure 8A). 다만 외부에 인접한 연도 바닥은 내부 공간에서 온도가 가장 낮았고, 현실과 약 4℃ 차이가 나타났다. 봄철은 고분 구조의 특성으로 인해 방위와 위치 상관없이 공기 중 온도의 경향과 동일하게 계절 중 가장 낮게 측정되었다(Figure 8B). 현실의 위치별 표면온도 차이는 1℃ 내외였고, 현실에서 연도로 갈수록 외부 환경과의 인접성으로 인해 온도가 높아지는 것이 확인되었다. 여름철은 사계절 중 상부와 하부의 표면온도 차이가 가장 높았고, 천장면은 외부 환경의 영향으로 바

Figure 6. Comparison of ceiling and floor surface temperature in main room and aisle.

Figure 7. Average of monthly relative humidity in different spaces.

다면보다 높았다(Figure 8C). 또한 봄철과 유사하게 외부의 영향으로 출입구에 인접해질수록 온도가 높아졌다. 가을철은 고분 내부의 공기 중 온도의 경향과 동일하게 현실 내부 표면온도가 가장 높았고(Figure 8D), 현실 내부의 표면온도 차이는 1°C 내외였다. 연도의 출입 부근의 천장면은 19.4°C로 바닥면과 3.4°C의 큰 차이를 보였다.

계절별 결로 발생 현황을 관찰한 결과, 겨울철(1월)이

결로 발생이 가장 심했고, 봄철(4월)까지 지속되는 것으로 확인되었다(Figure 9A). 여름철(7월)과 가을철(10월)의 경우, 천장면에 직접적인 결로 발생은 확인되지 않았다. 결로가 발생하는 시기는 현실 내부의 표면온도가 천장면이 바닥면보다 낮고, 현실의 공기 중 온도보다 낮을 때 발생하는 것으로 확인되었다. 결로는 일반적으로 천장, 벽, 바닥 등의 표면 또는 그 내부 온도가 그 위치의 습공기의 노점 이

Figure 8. Comparison of surface temperature change inside the mural tomb by different seasons(A: Winter/January, B: Spring/April, C: Summer/July, D: Fall/October).

Figure 9. The present condition of condensation on the ceiling in main room(A) and aisle(B) by different seasons.

Table 1. Gene analysis of surface microorganisms on wall (First investigation)

Strain No.	Description	Identities	Accession	Phylum
1-F*1	<i>Purpureocillium lilacinum</i>	1036/1036(99%)	KC157751	Ascomycota
1-F2	<i>Chaetomium udagawae</i>	904/907 (99%)	GU183108	Ascomycota
1-F3	<i>Monographella lycopodina</i>	459/468 (98%)	JF440979	Ascomycota
1-F4	<i>Purpureocillium lilacinum</i>	980/980 (99%)	KC790527	Ascomycota
1-F5	<i>Fusarium sporotrichioides</i>	919/919 (99%)	EU520119	Ascomycota
1-F6	<i>Talaromyces flavus</i>	944/944 (99%)	EF123253	Ascomycota
1-F7	N.D.***	-	-	-
1-F8	<i>Aspergillus clavatus</i>	980/980 (99%)	HQ026749	Ascomycota
1-F9	<i>Penicillium meleagrimum</i>	1045/1045 (100%)	JF439496	Ascomycota
1-F10	<i>Aspergillus ochraceus</i>	957/957 (99%)	GU134890	Ascomycota
1-F11	<i>Talaromyces flavus</i>	930/930 (99%)	JN624905	Ascomycota
1-F12	<i>Mortierella ambigua</i>	926/926 (95%<)	JX976120	Zygomycota
1-F13	<i>Fusarium oxysporum</i>	931/931 (100%)	JF439472	Ascomycota
1-F14	<i>Cunninghamella elegans</i>	1216/1216 (99%)	FJ792589	Zygomycota
1-F15	<i>Lecanicillium psalliotae</i>	964/964 (99%)	AB378518	Ascomycota
1-F16	N.D.***	-	-	-
1-F17	<i>Alternaria</i> sp.	933/933 (100%)	FJ904813	Ascomycota
1-F18	N.D.***	-	-	-
1-B**1	N.D.***	-	-	-
1-B2	<i>Paenibacillus terrae</i>	1018/1026 (99%)	NR025170	Firmicutes
1-B3	<i>Cupriavidus necator</i>	1106/1118 (99%)	AB167205	Proteobacteria
1-B4	<i>Bacillus subtilis</i>	1087/1089 (99%)	KC212006	Firmicutes
1-B5	<i>Bacillus megaterium</i>	997/1003 (99%)	GU048867	Firmicutes
1-B6	<i>Bacillus subtilis</i>	1062/1082 (98%)	KC692170	Firmicutes

*F: Fungi, **B: Bacteria, ***N.D.: Non detected

Table 2. Gene analysis of surface microorganisms on wall (Second investigation)

Strain No.	Description	Identities	Accession	Phylum
2-F*1	<i>Aspergillus fumigatus</i>	966/966 (99%)	GU390693	Ascomycota
2-F2	<i>Chaetomium globosum</i>	930/930 (99%)	GU934507	Ascomycota
2-F3	<i>Talaromyces flavus</i>	944/944 (99%)	EF123253	Ascomycota
2-F4	<i>Acremonium nepalense</i>	875/875 (98%)	GU586837	Ascomycota
2-F5	<i>Coprinopsis atramentaria</i>	1213/1213 (99%)	FJ478115	Basidiomycota
2-F6	N.D.***	-	-	-
2-F7	<i>Penicillium pancosmum</i>	948/948 (99%)	JN617660	Ascomycota
2-F8	N.D.***	-	-	-
2-F9	<i>Mortierella ambigua</i>	926/926 (95%<)	JX976120	Zygomycota
2-F10	<i>Fusarium oxysporum</i>	931/931 (100%)	JF439472	Ascomycota
2-F11	<i>Trichoderma</i> sp.	1070/1070 (99%)	AY154946	Ascomycota
2-F12	N.D.***	-	-	-
2-F13	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	899/899 (99%)	JF303884	Ascomycota
2-F14	N.D.***	-	-	-
2-F15	N.D.***	-	-	-
2-B**1	N.D.***	-	-	-
2-B2	<i>Chryseobacterium</i> sp.	1104/1112 (99%)	JF700385	Bacteroidetes
2-B6	<i>Paenibacillus terrae</i>	1086/1104 (98%)	NR025170	Firmicutes
2-B7	N.D.***	-	-	-
2-B8	<i>Bacillus</i> sp.	1095/1096 (99%)	KC465359	Firmicutes

*F: Fungi, **B: Bacteria, ***N.D.: Non detected

하로 되었을 때 공기 중의 수증기가 액화되면서 맺히게 된다. 결로 발생 시기는 위의 조건이 형성되는 12월부터 4월 까지 천장면, 특히 벽화가 그려진 곳에 발생하게 된다.

현실 천장면의 경우, 표면온도와 공기 온도 조건이 맞는 겨울철과 봄철에 결로가 발생하지만 연도 천장면의 경우, 1년 내내 결로가 발생하는 것으로 확인되었다(Figure 9B). 이는 외부의 공기가 유입되어 연도 천장면 온도를 기준으로 더 높은 온도의 공기가 유입되면서 결로를 지속적으로 형성하는 것으로 판단된다. 이러한 결로는 벽화, 그림층에 직접적으로 형성되면서 그림층의 손상을 유발하게 된다. 그림층과 지지층 사이에 물방울이 형성되면서 2개의 층 사이에 이격이 발생한다. 지속적인 수분 공급으로 물방울이 커지게 되면 그 무게로 인해 낙하하며, 그와 함께 그림층도 박락될 위험성이 크다.

3.3. 미생물 분포

3.3.1. 벽체 표면미생물의 분리 동정

고분 내 벽체에서 분리한 표면미생물의 염기서열 분석

결과, 1차 조사에는 곰팡이 15종, 세균 5종이 동정되었다(Table 1). 곰팡이는 자낭균류 13종, 접합균류 2종이며 세균은 후벽균류 4종과 프로테오박테리아 1종이었다. 2차 조사에는 자낭균류와 담자균류, 접합균류에 속하는 곰팡이 10종과 후벽균류와 박테로이디스에 속하는 세균 3종이 동정되었다(Table 2).

3.3.2. 채집 위치에 따른 벽체 표면미생물의 비교

1차 조사 시 현실(동·서·남·북)과 연도에서 분리된 미생물은 총 22종이었고 2차 조사에서는 12종이 분리되었다. 1, 2차 조사에서 확인된 미생물 종의 수는 현실의 동측면(1차: 8종, 2차: 3종)과 연도(1차: 6종, 2차: 7종)에서 가장 많았다(Table 3).

1, 2차 조사에서 모두 토양에서 발견되는 곰팡이 3종(*Fusarium oxysporum*, *Mortierella ambigua*, *Talaromyces flavus*)과 세균 1종(*Paenibacillus terrae*)이 확인되었고, *Mortierella ambigua*와 *Paenibacillus terrae*는 동일한 위치에서 2회 분리 배양되었다. 그리고 2곳 이상의 위치에서 채집된 미생물은 *Bacillus megaterium*(1차: 현실 서·남·북측

Table 3. Comparison of surface microorganisms distribution on wall by bearings

Species	October, 2012 (1st)					April, 2013 (2nd)				
	Main room				Aisle	Main room				Aisle
	E*	W	S	N		E	W	S	N	
<i>Acremonium nepalense</i>										○
<i>Alternaria</i> sp.	○				○					
<i>Aspergillus clavatus</i>	○									
<i>Aspergillus fumigatus</i>						○				
<i>Aspergillus ochraceus</i>			○							
<i>Bacillus megaterium</i>		○	○	○						
<i>Bacillus</i> sp.										○
<i>Bacillus subtilis</i>	○		○							
<i>Chaetomella raphigera</i>										
<i>Chaetomium globosum</i>										○
<i>Chaetomium udagawae</i>					○					
<i>Chryseobacterium</i> sp.									○	
<i>Cladosporium cladosporioides</i>										○
<i>Coprinopsis atramentaria</i>										○
<i>Cunninghamella elegans</i>					○					
<i>Cupriavidus necator</i>		○								
<i>Fusarium oxysporum</i>	○						○			
<i>Fusarium sporotrichioides</i>	○									
<i>Lecanicillium psalliotae</i>					○					
<i>Monographella lycopodina</i>			○							
<i>Mortierella ambigua</i>	○					○				
<i>Paenibacillus terrae</i>	○					○				
<i>Penicillium meleagrimum</i>					○					
<i>Penicillium pancosmium</i>										○
<i>Purpureocillium lilacinum</i>					○					
<i>Talaromyces flavus</i>	○			○						○
<i>Trichoderma</i> sp.										○
Total	8	2	4	2	6	3	1	0	1	8

*E: East wall, W: West wall, S: South wall, N: North wall

면)과 *Bacillus subtilis*(1차: 현실 동·남측면), *Talaromyces flavus*(1차: 현실 동·북측면)로 확인되었다.

3.4. 고령 고아리 벽화고분 손상 위험기간 예측

고령 고아리 벽화고분 공간을 1년간 모니터링한 결과, 고분의 내부와 외부의 온도는 약 1~2달간의 격차를 두고 변화하였다. 이러한 현상은 고분에 조성된 봉분과 관계가

있는데, 고분 현실의 천장면과 봉분의 최고점은 3 m 차이가 있다. 고분에 형성된 두꺼운 토양층이 고분 내부 온도의 변화와 완충제 역할을 하는 것으로 예측된다(Kim *et al.*, 2016). 현실과 연도 천장면에는 벽화가 존재하고 있다. 현실 천장면과 바닥면의 표면온도와 계절별 고분 내부 상태 조사를 통해 결로 발생을 확인한 결과를 토대로 월별 고분 현실 결로 예측도를 제작하였다(Figure 10). 12월부터 4월까지는 천장 온도가 현실 공기 중 온도 보다 낮음에 따라

공간 내 100%로 포화된 수증기는 천장면으로 응축되어 결로가 생성된다. 천장면, 특히 벽화에 발생된 결로는 그림층의 박락으로 이어질 수 있기 때문에 결로 제어 또는 예방 방안이 필요할 것으로 사료된다.

고분은 부정형의 사암으로 축조된 구조로 사암 부재 사이에 이격 부위가 많고, 부재 자체에 균열이 잘 발달되어 있다. 미생물이 발생하면 그 틈으로 균사가 침투하여 생장할 가능성이 높다. 이러한 형태로 미생물이 생장하게 되면 살균처리가 어렵고, 지속적으로 미생물에 의한 열화가 발생할 수밖에 없다. 벽화에 발생한 미생물에 의한 가장 일반적인 문제는 변색과 표면 손상이다. 미생물은 다양한 색상의 대사산물로 그림층을 오염시킨다. 또한 미생물 발생에 의한 손상은 물리적인 손상, 화학적인 손상으로 분류할 수 있다. 물리적인 손상은 미생물이 생장하면서 벽화의 그림층, 지지체 등에 균사가 침투하고 확장하면서 박락을 유발하는 것이다. 화학적인 손상은 앞서 언급한 색소로 인한 오염 외에도 산성 물질이나 효소 발생을 통해 안료나 접착제를 용해시킨다(Garg et al., 1995).

공간 내 공기중 부유균과 표면 미생물을 포집한 결과 곰팡이는 22종, 세균은 9종이 확인되었다. 미생물 종은 고분 현실의 동측면과 연도에서 가장 많이 분류되었는데, 연도의 출입구와 인접성에서 기인한 것으로 판단된다. 동정된 곰팡이 *Acremonium* sp., *Aspergillus* sp., *Cladosporium* sp.,

Fusarium sp., 외 5속과 세균 *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp.은 공주 송산리 6호분과 무령왕릉, 부여 능산리 동하층 고분 벽화에서도 분리되었다(Lee et al., 2014; Baekje World Heritage Center, 2016). 일본의 다카마쓰즈카와 키토라 고분에서도 *Acremonium* sp. 외 5속(*Aspergillus* sp., *Cladosporium* sp., *Fusarium* sp., *Penicillium* sp., *Trichoderma* sp.)이 분리되었고(Kigawa et al., 2009), 프랑스 라스코 동굴벽화에서 *Fusarium* sp.이 발견된 바 있다(Dupont et al., 2007). 그리고 미생물은 생장온도 범위에 따라 저온균, 중온균, 고온균으로 분류된다(Choi, 2004).

포집된 균주들의 적정 생장 온도는 24℃이지만 일반적으로 미생물은 20℃가 넘는 온도 조건에서 생장 가능하며, 15℃ 미만의 경우 대부분 생장을 멈추고 내생포자를 형성한다. 이러한 생장 온도 조건을 기준으로 미생물 발생 위험 예측도를 제시했다(Figure 10). 15℃ 미만은 안전기간, 15~20℃는 경계기간, 20℃는 위험기간으로 20℃를 넘었던 8~10월은 미생물이 발생할 수 있고, 15℃ 미만인 12월부터 5월까지의 미생물로부터 안전한 기간이다(Chung et al., 2012).

결로 발생 예측도와 미생물 발생 위험 예측도는 서로 위험기간이 상충한다. 고분의 환경 특성상 밀폐가 중요하기 때문에 위험기간에 관리자가 수시로 확인하고 조치를 취하기엔 어려움이 있다. 따라서 벽화를 보존하기 위한 결로 제어 시스템과 미생물 제어를 제균 시스템이 필요할 것으로 판단된다.

Figure 10. Prediction of damage risk period at mural tomb in Goa-ri, Goryeong.

또한 고분을 장기적으로 보존하기 위해서는 송산리 6호분과 능산리 1호분처럼 외부 환경의 유입을 최소화 할 수 있는 별도의 출입시설 설치 등의 종합적인 공간계획 수립이 필요하다. 현재 고아리 벽화고분은 외부에서 출입문을 열면 바로 연도에서 현실로 이어지는 구조이다. 그러므로 문의 개폐에 따른 고분 내부의 밀폐환경에 영향을 주고 외부 미생물의 유입으로 인해 미생물에 의한 손상 위험도가 증가될 수 있다. 따라서 고분 내부의 안정적인 보존환경을 위해 연도 진입 전에 완충공간(buffering zone)과 이후 모니터링 및 환경 제어시스템 구축 등을 위한 별도의 출입시설이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

고아리 벽화고분을 대상으로 보존환경을 평가하기 위해 온도 및 미생물을 대상으로 연간 모니터링을 실시하였다. 그 결과, 고분 현실은 연평균 온도차가 11.7℃로, 외부 환경에 빠르게 반응하는 것으로 확인되었다. 또한 벽화가 존재하는 현실 천장면과 연도의 천장면에 결로가 발생하는 것이 확인되었다. 현실은 겨울에서 봄, 12월부터 4월까지 결로가 발생했지만 연도는 연중 결로가 발생하였다. 미생물 분포를 확인하고 그 위험성을 예측한 결과, 공기 중에서 흔하게 확인되는 부유균이 우점종으로 확인되었다. 프랑스 라스코 동굴벽화 및 일본 키토라, 다카마쓰즈카에서 발견된 사례가 있는 *Fusarium* sp.가 확인되어 고아리 벽화고분의 저온·고습한 환경에서 성장할 가능성이 높을 것으로 예측된다. 고아리 벽화고분에서 확인된 미생물의 적정 생장 온도는 24℃로 이는 20℃가 넘는 조건에서 생장이 가능함에 따라 8~10월이 미생물 발생 위험기간으로 예상된다.

결로 발생기간과 미생물 위험 기간은 서로 상충됨에 따라 이에 따른 상시 모니터링 및 관리가 필요하다. 고분의 특성상 주기적인 출입의 어려움이 있음에 따라 차후 결로 제어시스템과 미생물 제어를 위한 환경 시스템 구축이 요구된다.

REFERENCES

- Baekje World Heritage Center, 2016, Conservation environment monitoring of Buyeo Neungsan-ri ancient tombs. 56-74. (in Korean)
- Cho, W.C., 2008, A study on the period of added burial which reflected on the mural painting tumulus of Great Gaya based on the lotus flower patterns. The Journal of Paekche Culture, 39, 33-51. (in Korean with English abstract)
- Choi, H.H., 2004, Microbiology. Acabook, 153.
- Chung, Y.J., Kang, D.I., Han, K.S. and Hong, S.G., 2010, Conservational research of Baekje Songsan-ri tomb No. 6. Research and Service Report of Gyeongju-si, Chungcheongnam-do Province. (in Korean)
- Chung, Y.J., Kang, D.I., Han, K.S. and Hong, S.G., 2012, Research of conservational methods for mural paintings in Songsan-ri tomb. Research and service report of Gyeongju-si, Chungcheongnam-do Province, 89-176. (in Korean)
- Ciferri, O., 1999, Microbial degradation of paintings. Applied and environmental microbiology, 65(3), 879-885.
- Dupont, J., Jacquet, C., Denetiere, B., Lacoste, S., Bousta, 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.
- Garg, K.L., Jain, K.K. and Mishra, A.K., 1995, Role of fungo in the deterioration of wall paintings. The Science of the Total Environment, 167, 255-271.
- Jung, H.S., 2009, Study on construction of Koguryo tombs and sacrificial rites. Ph. D. dissertation, Korea University, Seoul, 1-6. (in Korean with English abstract)
- Jung, H.S., 2014, The construction and features of Gaya Goadong murals. Prehistory and Ancient History, 40, 165-188. (in Korean with English abstract)
- Kang, D.I., 2013, Current status of wall painting conservation in Japan. Journal of Korean Traditional Cultural Heritage, 11, 169-195. (in Korean with English abstract)
- Kang, D.I., 2012, Conservation of mural paintings of Takamatsuzuka Tumulus. Journal of Korean Traditional Cultural Heritage, 10, 110-127. (in Korean with English abstract)
- Kigawa, R., Sano, C., Ishizaki, T., Miura, S. and Sugiyama, J., 2009, Biological issues in the conservation of mural paintings of Takamatsuzuka and Kitora tumuli in Japan. National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, 43-50.
- Kim, D.W., Jeong, S.H., Lee, M.Y. and Chung Y.J., 2016,

- Thermal environment analysis for preserving ancient mural painting in Songsan-ri tomb No. 6, Gongju, Korea. *Journal of Conservation Science*, 32(4), 521-534. (in Korean with English abstract)
- Kim, W.Y., 1964, Summary in Goari tomb in Goryeong. *Korean Journal of Art History*, 5(3), 499-501. (in Korean)
- Lee, K.M., Lee, H.S. and Han, K.S., 2015, The research of condition for mural tomb in Goa-ri, Goryeong in Gaya period. *Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 48(4), 45-61. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.Y., Kim, D.W. and Chung, Y.J., 2014, Conservation environmental assessment and microbial distribution of the Songsan-ri ancient tombs, Gongju, Korea. *Journal of Conservation Science*, 30(2), 169-179. (in Korean with English abstract)
- Moon, W.S., Hong, J.O., Hwang, J.J., Kim, S.K. and Cho, N.C., 2002, Scientific analysis of ancient mural pigments. *Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 35, 160-185. (in Korean with English abstract)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2007, Current preservation states of Koguryo mural tombs under the operation of the South and North Korea II. 219-253. (in Korean)
- Portillo, M.C., Ganzalez, J.M. and Saiz-Jimenez, C., 2007, Metabolically active microbial communities of yellow and grey colonizations on the walls of Altamira cave, Spain. *Journal of Applied Microbiology*, 104(3), 681-691.
- Portillo, M.C., Saiz-Jimenez, C. and Ganzalez, J.M., 2009, Molecular characterization of total and metabolically active bacterial communities of “white colonizations” in the Altamira cave, Spain. *Research in Microbiology*, 160(1), 41-47.
-