

# 공주 송산리 6호 벽화고분 보존을 위한 온열환경 분석 연구

김대운 | 정선희\* | 이민영\*\* | 정용재\*<sup>1</sup>

한국전통문화대학교 학교기업 Con-Tech  
\*한국전통문화대학교 문화유산융합대학원 수리복원학과  
\*\*한국전통문화대학교 문화재예방보존연구소



## Thermal Environment Analysis for Preserving Ancient Mural Painting in Songsan-ri Tomb No. 6, Gongju, Korea

Dae Woon Kim | Sun Hye Jeong\* | Min Young Lee\*\* | Yong Jae Chung\*<sup>1</sup>

Con-Tech, School-based Enterprise, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 33115, Korea  
\*Department of Heritage Conservation & Restoration, Graduate School of Convergence 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

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

**초록** 고분은 구조적 특성상 대부분 좁고 밀폐된 공간으로 이루어져 있으며, 고분을 둘러싼 높은 봉분으로 인해 외부 환경으로부터 일부 차단된 공간적 특성을 갖는다. 이러한 공간적 특성은 연중 낮은 온도와 높은 상대습도가 유지되는 환경적 특성으로 이어진다. 연구 대상인 공주 송산리 고분군은 외부로부터 고분 내부로 유입되는 열에너지가 고분을 덮고 있는 토양층과 다수의 연결된 출입구로 인해 열의 흐름이 차단되거나 지연되는 것으로 확인되었다. 이러한 열 흐름의 특이성(특수성)은 고분 내부 환경과 외부 환경 사이에 약 2개월의 시간적 격차를 발생시키고 있었다. 또한 고분 외부에서 차등적으로 유입되는 열에너지로 인해 고분 내부의 환경은 수평적, 수직적으로 미세한 환경적 차이가 발생되었다. 고분 내부에서 발생된 미시환경의 차이는 매년 규칙적으로 발생되고 있었으며, 이러한 특성을 활용하여 방위 및 공간에 따른 환경조건과 결로현상 발생위치를 예측할 수 있었다. 또한 최적 보존환경을 유지하기 위해 설치된 강제순환식 향온향습기의 고분 벽화 손상 위험성과 기계적 한계점을 제시하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 송산리 고분과 고분 벽화를 보존하기 위한 최적의 공조 설비 방안 및 공간계획수립에 있어 기반자료로 활용되기를 기대한다.

**중심어:** 송산리 고분군, 고분 벽화, 보존 환경, 미시 환경 분석, 결로 현상

**ABSTRACT** Ancient tombs are typically comprised of confined rooms, which have different spatial characteristics than the external environment because they are covered by heavy layers of soil. In this study, we examined the thermal energy flow from the outside to inside of Songsan-ri tomb No. 6. External heat flows slowly to the inside because of heavy soil layer, and the presence of several rooms and entrances. For this reason, it takes about two months for the air temperature to travel from the outside to the inside of the tomb. Interestingly, the gradational inflow of thermal energy from outside the tomb leads to delicate horizontal and vertical variations in the wall temperature. These micro-environmental differences

occur in the inner tomb every year, so we can expect them to cause condensation with regularity. In addition, we show that the previously installed forced circulation air conditioning system risks fatal damage to the mural wall painting. The results of this research suggest an optimal air conditioning system and optimized space planning to conserve Songsan-ri tomb No. 6 and its mural painting.

Key Words: Songsan-ri tomb, Mural painting, Conservation environment, Micro-environmental analysis, Condensation

## 1. 서 론

일제 강점기부터 현재에 이르기까지 송산리 고분군을 보존하기 위해 많은 노력을 기울였으나, 현재 고분 내부는 원형이 훼손되고, 벽화 역시 그 형체를 거의 알아보기 힘들 정도로 손상되었다(Han, 2011). 송산리 고분은 백제시대 축조 이후 발굴되기까지 약 1,000여 년간 낮은 온도와 높은 상대습도가 유지되는 환경적 특성을 유지하며 보존되어 왔다. 하지만 송산리 고분군은 일제강점기 발굴 이후 지속적으로 일반인에게 관람이 허용되어, 고분 내부가 외부 환경 인자로부터 노출되어 왔다(Kim *et al.*, 2014). 즉, 고분이 발굴된 시점에서 잠정 폐쇄가 결정된 약 60여 년 동안 고분은 급격한 환경 변화와 외부 손상인자에 노출되면서 매우 빠른 속도로 심각한 손상이 진행되었을 것이라 예상된다(Suh *et al.*, 1998). 하지만 다행히도 2000년 학술연구용역보고서의 결과에 따르면 송산리 고분군은 내부 출입 제한조치와 보수공사 이후 구조 안정성, 누수현상, 납조류 발생 등 고분에서 발생되고 있는 문제점이 어느 정도 해결된 것으로 판단되었다(Suh *et al.*, 2000; Suh, 2001). 따라서 고분과 벽화는 다시금 이전의 상태인 안정화 상태로 회복되고 있을 것이라 예상하였다.

하지만 지난 2010년 송산리 6호 고분 벽화 전반에 걸쳐 마감층의 건조, 균열, 탈락 등의 현상이 확인되었다(Chung *et al.*, 2010). 이러한 벽화의 손상은 1997년 고분의 폐쇄와 함께 가동을 시작한 공기조화 설비에서 기인된 것으로 사료된다(Jun *et al.*, 2004; 2006; Park *et al.*, 2007; Jin and Aum, 2014). 송산리 고분군 내부의 보존을 위해 1997년 최초로 설치된 열풍식 제습기는 고온의 바람을 이용하여 제습하는 방식이었다. 열풍식 제습 방식을 줌고 밀폐된 구조적 특성을 갖는 고분에 적용하여 고분 내부의 온도가 급격하게 상승되는 문제점이 나타났다. 더욱이 당시 무령왕릉의 경우 공간 내부에 균일한 환경조건이 조성되지 않아 일부 벽돌 표면에 다량의 수분이 응결되었으며, 이때 발생한 수분을 이용하여 납조류의 증식이 이루어지기도 하였

다(Suh *et al.*, 1997). 열풍식 제습기의 설치 후 1년도 되지 않아 1998년 에어컨과 제습기를 병행하여 가동시키는 방식으로 전환되었으나 당시의 기술력으로는 높은 상대습도를 나타내는 고분 내부의 습도를 기기적으로 제어하기에 한계가 있어 잦은 고장과 내부 결로현상이 발생하는 등의 문제점이 나타났다. 이러한 문제점으로는 제습기가 가동되면 짧은 시간 안에 74%까지 급격하게 습도가 낮아지며, 이로 인해 다시 제습기가 가동을 멈추면 다시 100%까지 상대습도가 치솟는 현상이 나타나고 있었다. 이 변화는 제습기의 가동 여부에 의해 결정되어 심지어 6호분의 경우 제습기 가동 중에는 제습효과의 과다로 고분 벽화 벽체의 진흙이 건조되어 떨어지는 현상이 발생하고 있었다. 이후 2004년 향온제습기 방식의 공조시설이 설치되었다. 하지만 고분 내부의 환경 모니터링 및 기기 고장 등을 확인하기 위해서는 반드시 고분 내부에 출입하여야만 확인이 가능하여 기기 고장 등의 고분 내부 환경이 급변할 시 초동대응이 불가하여 고장 발생 이후 수개월 동안 수리되지 못하는 등 내부 환경의 급격한 변화가 자주 발생되었을 것이라 예상된다.

발굴 이전의 송산리 고분군은 봉분으로 뒤덮여 있을 뿐 아니라 폐쇄된 상태로 내부의 공기 순환은 거의 없다고 볼 수 있을 것이다. 하지만 고분 내부의 고습한 환경을 제어하기 위해 2004년 설치된 향온항습기와 덕트(Duct)는 차고 건조한 바람이 고분 벽화에 직접적으로 부딪히게 되어 영향이 클 것으로 예상된다. 벽화의 벽체와 부딪치는 덕트의 바람으로 인해 벽체는 더욱 건조해지고, 이로 인한 균열 및 박락이 진행되었을 것이다(Lee *et al.*, 2014a). 실제로 향온항습시설이 설치된 2004년부터 향온항습기 가동을 중지한 2011년까지 고분 내부는 온도 18℃, 습도 90%의 환경조건이 설정되어 가동되었다. 특히 상대습도 90%의 환경조건은 이전의 제습기 사용으로 인해 발생하는 6호분 벽화의 건조현상 및 마감층의 탈락현상을 방지하기 위해 설정되었다. 하지만 이러한 환경조건설정에 불구하고 덕트를 이용한 공기조화방식으로 인해 차갑고 건조한 바람은 벽

화 마감층을 극건조, 균열, 탈락의 현상이 발생되고 있었다 (Chung *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2014b).

약 80여 년간의 송산리 고분군은 여러 선행 연구진의 노력에도 불구하고 극심한 손상을 겪어왔다. 이는 짧은 연구 기간 및 연구재원으로 인해 비롯되었을 수 있으나 실상은 고분이라는 공간적 특수성을 정확하게 고려하지 못했기 때문으로 사료된다. 고분 공간 내 수분 이동관계 및 미시환경에 대한 심도 있는 연구를 통해 고분 및 고분 벽화의 손상에 미치는 종합적인 연구를 통해 장기적인 보존방안 대책을 수립해야 할 것이며, 향후 고분 내부 온습도 환경에 대한 고려, 원형보존의 문제, 공조시설의 장기운전에 따른 운전성능 및 모니터링 등에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 향후 송산리 고분군을 보존할 수 있는 최적의 공기조화설비 및 공간계획수립에 있어 필요한 기반 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구 대상 및 방법

### 2.1. 연구 대상

송산리 고분군은 충청남도 공주시에 위치한 고분군으로써 6세기 전반 백제 웅진시기의 왕과 왕족의 무덤으로 추정되고 있다(Gongju National Museum, 2009). 백제 송산리 고분군은 본래 30여기의 무덤 중 현재 현재는 약 7기

가 남아있다. 송산리 고분군은 일제 강점기인 1927년 1-4호분이 발굴되었고 이후 일본인에 의하여 최초로 조사가 시작되었다. 1932년 1-4호분의 석실분 관람도로를 개설하는 과정에서 5호분 석실분이 발견되었으며, 이듬해인 1933년 5호분 발굴 조사 과정에서 전축으로 시설한 배수로가 발견됨으로써 6호분이 발견되었다. 이후 1971년 6호분 배수공사 중 우연히 무령왕릉이 발견되어 비로소 이 지역이 백제 왕릉지역으로 확인되었다(Lee, 1997).

송산리 6호 벽화고분과 무령왕릉은 중국 양나라와의 국제교류에 영향을 받아 전축분의 형태를 나타내고 있어 문화재적 가치가 더욱 높게 평가되고 있다(Suh *et al.*, 1997; Jung, 2011; Jang and Lee, 2013). 특히 송산리 6호 벽화고분은 부여 능산리 고분군 내 동하총과 함께 백제에서 확인되는 2기의 벽화고분 가운데 하나이며, 삼국시대 유일하게 전축분에 사신도가 그려진 고분으로 그 희소성 또한 높게 평가 받고 있다(Yoon, 2008). 이러한 문화재적 가치를 인정받아 송산리 고분군은 1963년 사적 제13호로 지정되었으며, 2015년 백제역사유적지구가 유네스코 세계문화유산으로 등재되면서 송산리 고분군의 국제적 관심이 집중되었다.

본 연구의 대상은 송산리 고분군 중 6호 벽화 고분이다. 송산리 6호 벽화 고분은 고분 내부 사면에 사신도 벽화가 존재하는 전축분의 형태이며(Figure 1), 고분 내부는 5개의 구역(현실, 연도, 전실, 전실 앞 공간, 출입구)으로 구분되어 있다.



**Figure 1.** Distant view and construction style of Songsan-ri tomb No. 6. (A) Aerial photograph of Songsan-ri tomb, (B) North side wall of Songsan-ri tomb No. 6, (C) South side wall of Songsan-ri tomb No. 6.

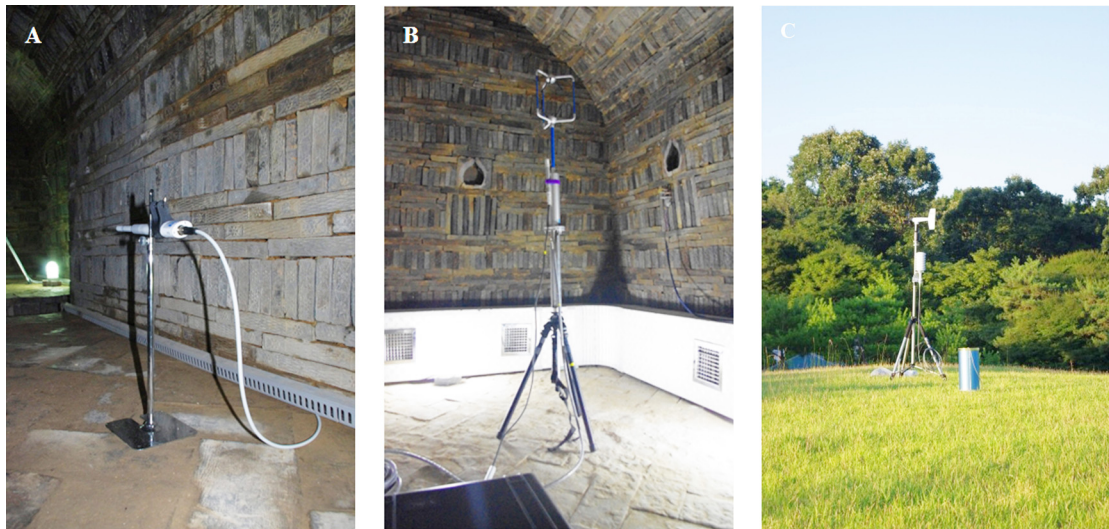
## 2.2. 고분 내부 환경 조사 방법

### 2.2.1. 자동 환경모니터링 시스템 설치

고분의 경우 구조적 특성상 밀폐된 좁은 공간과 고습한 환경조건에 지속적으로 노출되므로 일반적인 문화재 보존 환경과는 다른 특수성을 갖는다. 이러한 고분 내부의 보존 환경을 조사하기 위해서는 반드시 외부 환경인자로부터 차단된 환경의 유지가 필수적이다. 하지만 당시 고분 내부의 환경을 조사하기 위해서는 반드시 연구자 또는 관리자의 출입이 불가피 하였다. 따라서 본 연구에서는 장기적인 고분 내부의 보존환경 모니터링을 위해 고분 내부로 최소한의 인원만이 출입이 가능하도록 자동온습도관측시스템

및 환경 모니터링 장비를 고안하고 설치하였다.

자동온습도관측시스템은 고분 내부(Figure 2A) 및 외부(Figure 2C)에 온습도 센서(Vaisala, HMP155, Finland)와 벽체 표면온도 센서를 설치하고(Campbell Sci., 107, USA), 측정된 데이터가 무선으로 송산리 고분군 모형관 사무실에 설치된 서버에 자동으로 저장되어 실시간으로 고분 내부의 보존환경을 모니터링 할 수 있도록 설계하였다. 설치된 시스템의 제원은 Table 1과 같으며, 고분 내부와 외부에서 측정된 모든 환경 데이터는 10분, 60분 간격으로 평균 데이터가 자동 전송되도록 설계하였다. 또한 벽체 표면온도 센서의 부착은 향후 제거의 용이성과 고분의 원형 훼손을 방지하기 위해 천형 지점토를 이용하였다.



**Figure 2.** Automatic environmental monitoring modules at inner space and outer space of Songsan-ri tomb. (A) Temperature-humidity sensor, (B) Three-dimensional wind vane and anemometer, (C) Automatic weather station.

**Table 1.** Specification of sensors installed in Songsan-ri tomb No. 6.

Item	Model	Manufacturer	Specification
Temperature-humidity sensor	HMP155	Vaisala / Finland	- Range: $-80\sim 60^{\circ}\text{C}$ (Temp.), 0~100%(R.H.) - Accuracy : $\pm 0.05\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ (Temp.), $\pm 0.6 \sim 1\%$ (R.H.)
Surface temperature sensor	107	Campbell Sci. / USA	-Range : $-30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ -Accuracy : $\pm 0.2 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$
Wind direction velocity sensor	05103	RM Young / USA	-Range : 0~355(Wind direction), 0~100 m/s(Wind speed) -Max. Wind speed : 100 m/s -Accuracy : $3^{\circ}$ (Direction), 0.3 m/s(Speed)

자동온습도관측시스템을 통하여 확보한 환경 데이터의 기간은 2011년 7월부터 2012년 7월까지 약 1년이다. 고분 내부에 설치한 공기 온도 및 상대습도 센서의 수량은 총 7 곳으로 현실, 연도, 전실, 전실 앞 공간에 설치하였다 (Figure 3A). 또한 벽체 표면온도 센서는 총 6곳으로 현실 내부의 4방위와 천장면, 바닥면에 설치하였다(Figure 3B).

**2.2.2. 고분 내·외부의 환경 비교 분석**

고분 내부와 외부의 환경을 비교 분석하였다. 송산리 고분군의 내부와 외부의 환경 모니터링을 위해 외기상과 6호 고분에 자동 온습도 측정 장비를 설치하여 환경모니터링을 수행하였다. 이를 통해 고분 내 미시환경 분석 및 공간별 온습도 변화를 분석하여 연중 고분 내부의 환경 변화를 분석하고 고분 내부의 수분이동 관계를 해석함으로써 벽체 및 벽화 표면에서 발생하는 결로현상을 예측하는데 기반자료로 활용하였다.

**2.2.3. 공기조화기 가동 여부에 따른 고분 내부 풍향·풍속 변화**

송산리 고분은 봉분으로 뒤덮여 있을 뿐 아니라 영구 폐쇄된 상태로 외부 환경요인에 의한 인위적인 내부 공기의 순환은 없다고 볼 수 있다. 하지만 고분 내부의 고습의 환경을 제어하기 위해 2004년 설치된 향온항습기와 덕트 설치로 차고 건조한 바람이 고분 벽화에 직접적인 영향을 줄 것이라고 예상하였다. 따라서 송산리 6호 고분 내에 설치되어 있는 향온항습기와 덕트 설비의 가동 전과 후의 풍향과 풍속을 비교함으로써 덕트를 통해 발생하는 바람의 방향과 세기를 분석하였다. 바람의 방향과 세기는 벽화가 위치한 부분을 중심으로 분석하였다. 풍향 및 풍속의 비교는

3D 초음파 풍향·풍속계를 이용하였다(Figure 2B). 측정을 위하여 6호 벽화고분 현실 정 중앙에 3D 초음파 풍향·풍속계를 4-5일간 설치하여, 덕트를 제거하기 전과 후 그리고 향온·항습기의 가동 중과 가동 중지 후의 풍향, 풍속을 비교 분석하였다.

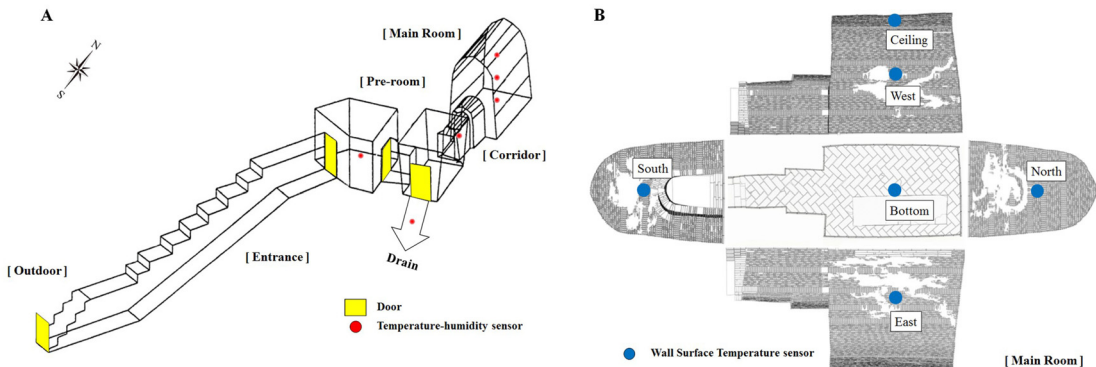
**2.3. 고분 내부 결로 발생 위치 조사 및 예측 연구**

**2.3.1. 계절별 고분내부 결로 발생 위치 조사**

계절별 결로 발생 위치를 조사는 육안으로 물방울이 맺혀있거나 빛에 반사되는 전돌 만을 대상으로 도면에 표시하였다. 또한 벽체 표면온도와 이슬점과의 관계를 파악하기 위하여 적외선온도계(Testo, 830-T2, Germany)를 이용하여 표면온도를 0.5℃ 단위로 측정하였다. 측정 장소는 6호분 내부 현실의 동, 서, 남, 북, 천장면이다. 측정일시는 계절별 결로 정도와 위치를 비교하기 위하여 1월, 4월, 5월, 7월, 9월에 조사하였다.

**2.3.2. 고분 내부 결로 발생 예측 분석**

고분 내부는 외부환경과 일부 차단된 내부의 특수한 온도와 습도의 변화양상을 나타낸다. 이러한 환경적 특수성은 고분을 둘러싸고 있는 다량의 토양층(봉분)에서 기인하며, 외부 환경 인자를 일부 차단하는 완충 역할을 수행한다. 하지만 이러한 완충 역할에도 불구하고 고분 외부로부터 내부로의 열전도는 끊임없이 발생하게 된다. 이와 같은 원리로 고분내부에서는 끊임없이 결로현상이 발생되며, 고분의 봉분, 또는 바다 토양층을 통해 유입되는 수분으로 항상 과포화 된 상태를 유지한다. 과포화 상태의 고분 내부



**Figure 3.** Points of temperature and humidity sensors in Songsan-ri tomb No. 6. (A) Air temperature-humidity sensor points (red circles), (B) Wall surface temperature sensor points (blue circles).

에 존재하는 전돌 및 벽화 마감층에서 형성된 미세한 온도 차이는 결로 현상으로 나타난다. 결로현상은 고분 내부의 공기 온도와 방위별 벽체 표면온도의 차이를 통해 예측이 가능하므로, 고분 내부의 미시환경을 분석하여 시간에 따른 결로가 발생 위치 및 방위를 예측하고자 한다. 그리고 이를 통해 최종적으로 자연 제습방안 제언하고자 한다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 송산리 6호 벽화 고분의 내부 미시환경 분석

##### 3.1.1. 고분 내부 공간별 온도 및 습도 변화 비교 분석 송산리 6호분의 내부 온도는 연중 12-21℃ 범위 안에서

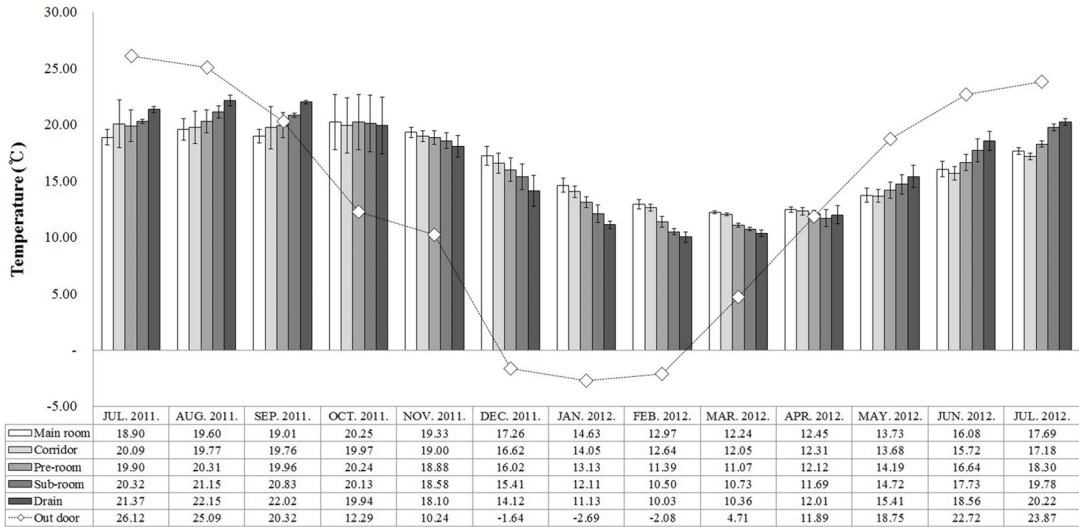


Figure 4. Comparison analysis of horizontal air temperature distribution in Songsan-ri tomb No. 6 by monthly.

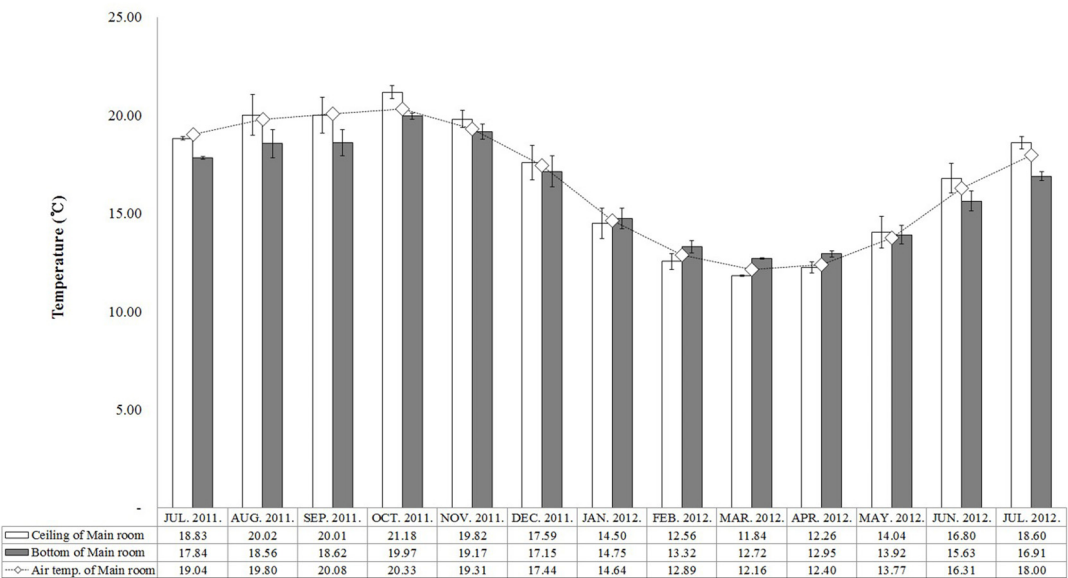


Figure 5. Comparison to wall surface temperature of ceiling and bottom in main room of Songsan-ri tomb No. 6 by monthly.

변화되고 있었다(Figure 4). 고분 내부의 연중 최고 온도는 10월에 확인되었으며, 최저온도는 3월에 확인되었다. 즉, 고분 내부의 온도는 외부 온도에 비해 상대적으로 최고 온도가 낮고 최저 온도가 높은 특성을 갖는다. 또한 월별 외부기상과 고분 내부 현실온도의 비교를 통해 고분 내부의 온도와 외부 온도는 약 2달간의 격차를 두고 변화되었다.

고분 내부의 수평적 온도변화 차이는 고분의 내부로 진입 할수록 연중 온도의 변화량이 작았다(Figure 4). 즉, 고

분의 가장 안쪽인 현실이 연중 온도변화가 가장 작으며, 출입구나 배수로 공간이 연중 온도변화가 상대적으로 컸다.

6호분 내부의 수직적 표면온도 변화를 보면 6월에서 12월에는 천장면이 바닥면보다 온도가 높았으며, 1월에서 4월은 바닥면이 천장면보다 온도가 높다(Figure 5). 상부와 하부의 표면 온도 양상이 변하는 시기는 1월이다.

6호분 내부의 수직적 공기 온도 분포는 앞서 표면 온도 변화와 비슷한 양상을 나타낸다. 6월에서 12월에는 상부가

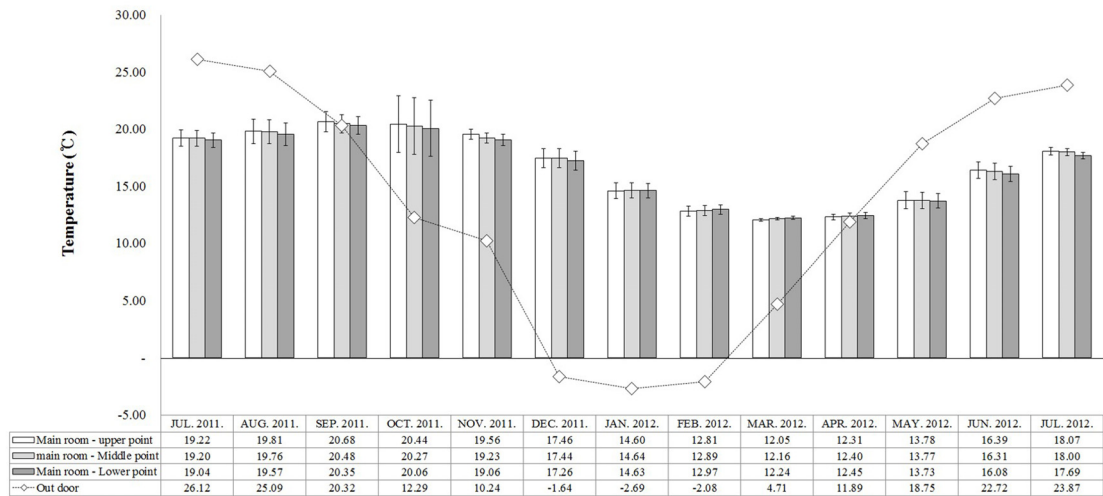


Figure 6. Comparison to air temperature of upper, middle, and lower points in main room of Songsan-ri tomb No. 6 by monthly.

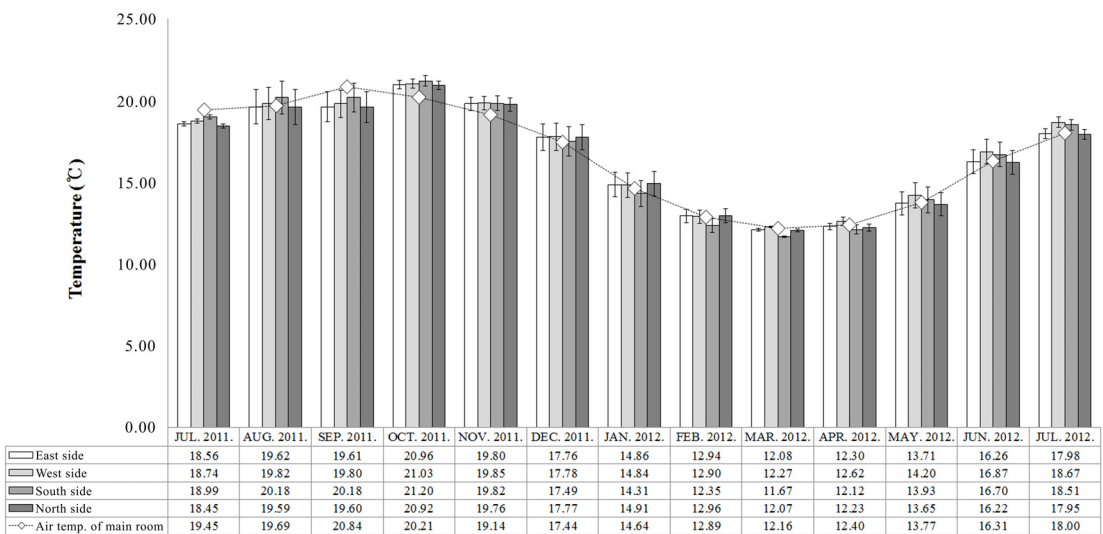


Figure 7. Comparison to wall surface temperature by directions in main room of Songsan-ri tomb No. 6 by monthly.

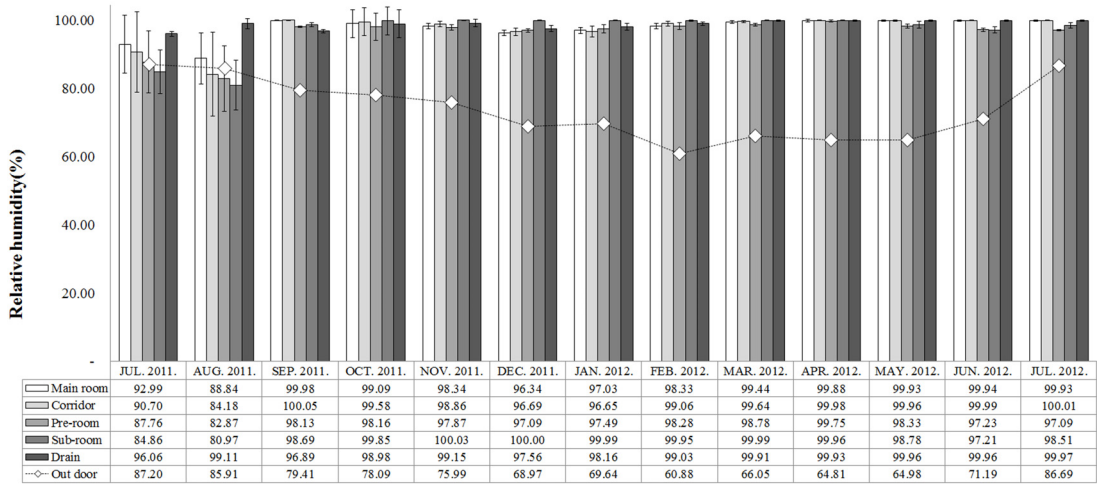


Figure 8. Comparison analysis of horizontal relative humidity distribution in Songsan-ri tomb No. 6 by monthly.

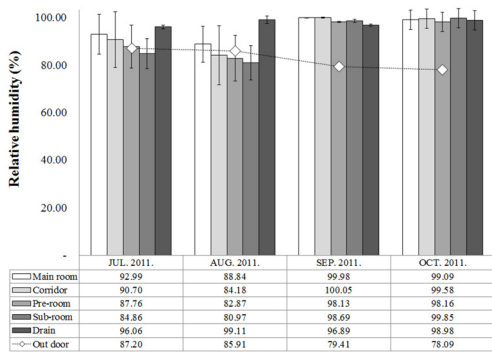


Figure 9. Comparison to relative humidity by operation and shutdown of thermo-hygrostat in main room of Songsan-ri No. 6.

하부보다 온도가 높으며, 1월에서 4월은 하부가 상부보다 온도가 높았다(Figure 6). 상부와 하부의 온도 양상이 변하는 시기는 달라지는 시기는 1월이다. 또한 방위별로 표면 온도의 변화량을 살펴보면 남측면의 표면온도가 동, 서, 북측면의 표면온도보다 차이가 큰 것을 확인 할 수 있었으며 (Figure 7), 고분 내부의 상대습도는 연중 80-100% 범위의 상대습도를 나타내어 외부 기상의 상대습도와 연관성이 없었다(Figure 8).

### 3.1.2. 공기조화기 가동 전과 후의 환경 변화 분석

공기조화기가 가동되던 7월에서 9월 사이의 고분 내부 온도와 상대습도는 극심한 편차를 발생시키고 있음을 확

인할 수 있었다(Figure 9). 특히 공기조화기에 영향을 가장 덜 받는 배수로와 월별 상대습도 평균량을 비교하였을 때 현실, 연도, 전실, 전실 앞 공간 모두 약 4-14%까지 변동이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 항온항습기의 가동을 중지하고 1개월이 지난 시점인 11월부터는 약 100%의 높은 고습 상태를 유지하였으나, 극심한 편차를 나타내는 현상은 나타나지 않았다. 즉, 모든 공간에 높은 습도가 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있었다.

### 3.1.3. 공기조화설비에 따른 고분 내부 풍향·풍속 변화

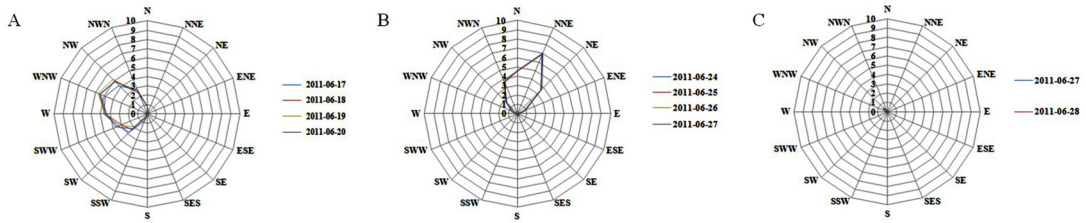
덕트 시설을 통해 고분 내부로 유입되는 차갑고 건조한 바람은 서남서 방향(6 m/s)으로 편중되는 것이 확인되었다 (Figure 10A). 덕트 시설을 제거한 후 풍향은 공조시설에서 발생된 모든 바람이 연도를 타고 북북동 방향(7 m/s)으로 변화되었다(Figure 10B). 이후 공기조화설비의 가동을 중지하고 측정한 결과에서는 특정한 방향성 없이 공기가 정체되는 것이 확인되었다(Figure 10C).

## 3.2. 고분 내부 결로 발생 위치 조사 및 예측 분석

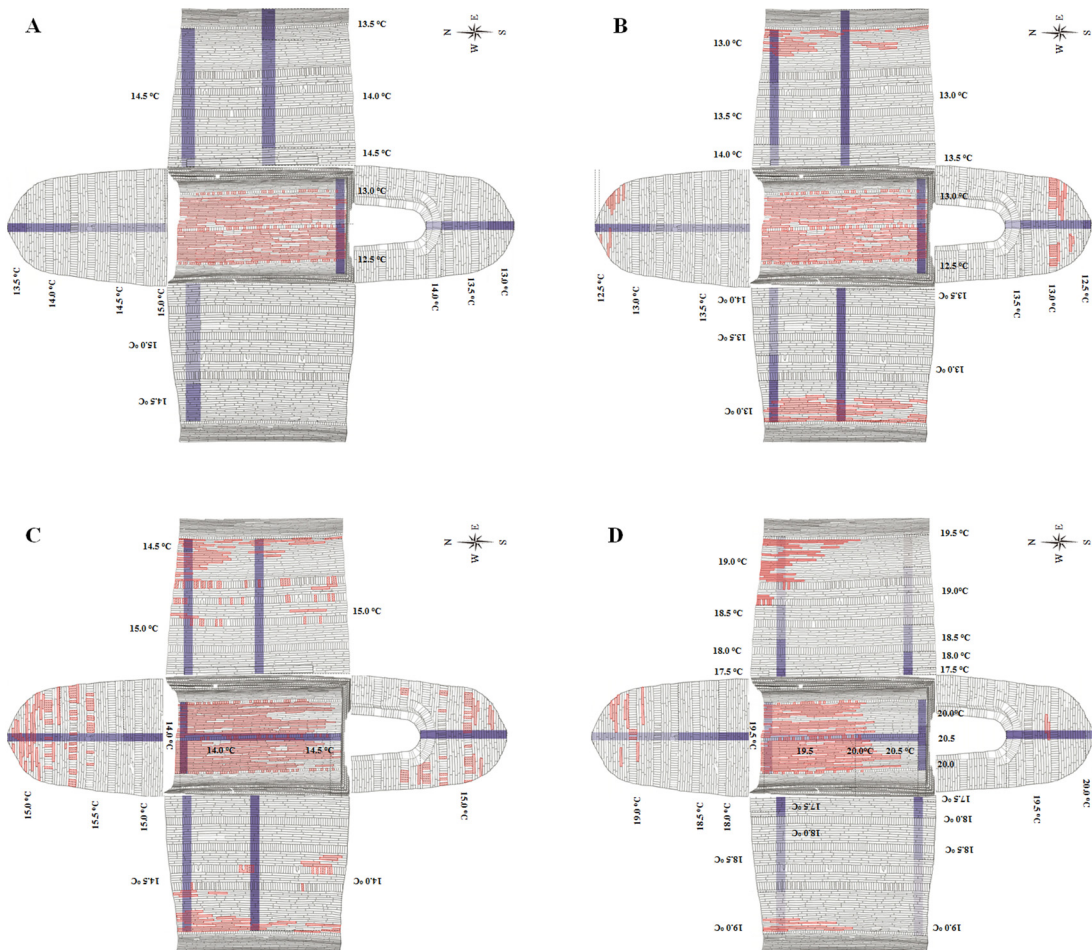
### 3.2.1. 계절별 결로 발생 위치 조사

1월의 경우 현실 4방위에서는 결로 현상이 확인되지 않았으나, 천장면 중앙에 집중된 결로현상이 발생되어 있었다(Figure 11A). 이는 천장면의 온도가 바닥면의 온도보다 낮아 상부에 집중적인 결로 현상이 발생한 것이다. 결로 발생 면적은 천장면의 총 667개의 전돌 중 105개의 전돌에





**Figure 10.** Analysis of wind direction velocity by thermo-hygrostat operation. (A) Thermo-hygrostat operate with duct facilities, (B) Thermo-hygrostat operate without duct facilities, (C) Thermo-hygrostat shutdown.



**Figure 11.** Area of condensate bricks in the main room of Songsan-ri tomb No. 6. (A) January, (B) April, (C) May, (D) July.

결과가 발생되어 15.7%로 확인되었다(Table 2).

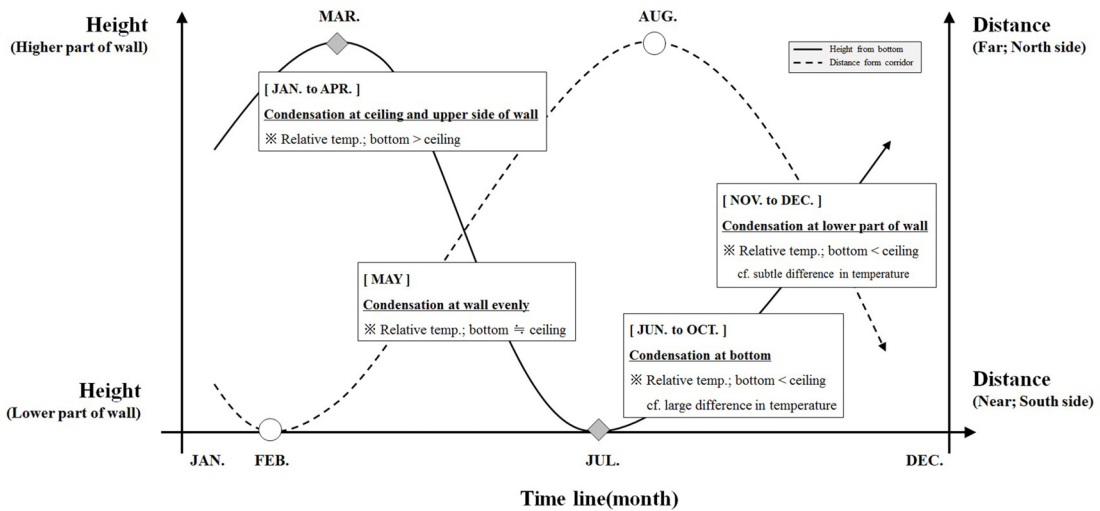
4월의 경우에도 천장부의 온도가 바닥면의 온도보다 낮아 천장에 결로 현상이 계속 진행되고 있었다(Figure 11B). 다만, 천장부와 바닥면의 온도의 차이가 줄어들어 4방위의

벽면 상부에도 결로현상이 발생되었다. 결로 발생 면적은 천장면이 51.4%로 1월에 비해 대폭 증가하였으며, 4방위에서는 1.9-7.7%의 결로 발생 면적이 확인되었다(Table 2).

5월의 경우에도 아직 천장부의 온도가 바닥면의 온도보

**Table 2.** Number of condensate bricks and area in the main room of Songsan-ri tomb No. 6.

	JAN. 2011	APR. 2011	MAY 2011	JUL. 2011	SEP. 2011
East (830 bricks)	0 / 0.0%	38 / 4.6%	94 / 11.3%	52 / 6.3%	0 / 0.0%
West (817 bricks)	0 / 0.0%	63 / 7.7%	60 / 7.3%	17 / 2.1%	0 / 0.0%
South (439 bricks)	0 / 0.0%	28 / 6.4%	50 / 11.4%	2 / 0.5%	0 / 0.0%
North (521 bricks)	0 / 0.0%	10 / 1.9%	71 / 13.6%	16 / 3.1%	0 / 0.0%
Ceiling (667 bricks)	105 / 15.7%	343 / 51.4%	352 / 52.8%	220 / 33.0%	0 / 0.0%



**Figure 12.** Predictive analysis of horizontal and vertical condensation by directions of wall surface temperature in main room of Songsan-ri tomb No. 6.

다 낮아 천장에 결로 현상이 계속 진행되었다(Figure 11C). 천장면의 경우 4월에 비해 결로 발생 면적이 더욱 증가하여 52.8%를 나타냈다. 다만, 남측면이 북측면보다 높은 온도가 형성되어 남측면의 결로 현상이 다소 줄어들고, 북측면에 결로현상이 더욱 집중되었다. 또한 천장부와 바닥면의 온도 차이가 더욱 줄어들어 4방위의 상부와 중부까지 결로현상이 확인되었다. 4방위 벽체의 결로 발생 면적은 7.3-13.6%로 확인되었다(Table 2).

7월의 경우 천장면과 벽체 상부, 중부에 발생되었던 결로현상이 다소 줄어드는 현상이 확인되었다(Figure 11D). 7월은 천장면의 온도가 점차 높아져 상대적으로 바닥면의 온도가 낮은 온도분포를 나타낸다. 따라서 천장면과 벽체 상부, 중부에 발생되었던 결로현상이 바닥면으로 집중되어 발생된 것으로 판단된다. 방위별 결로 발생 면적을 보면, 5월에 비해 남측면의 온도가 더욱 높아져 모든 벽체에서 북측에 결로현상이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 4

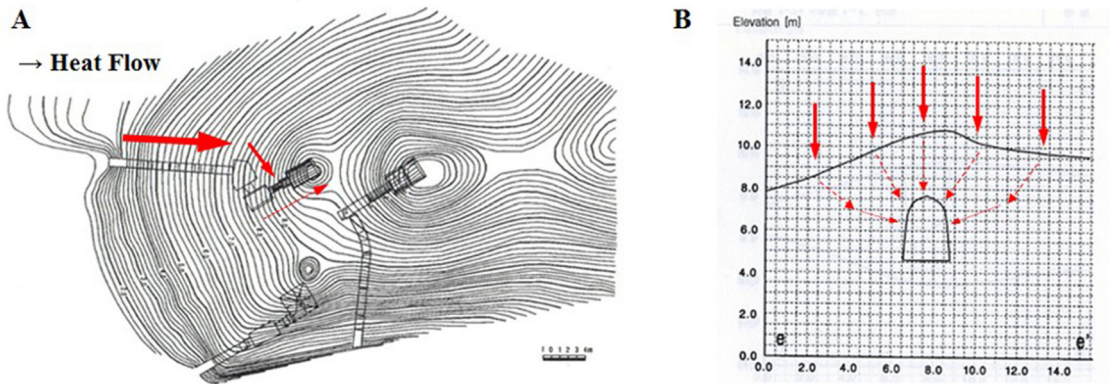
방위 벽체의 결로 발생 면적은 0.5-6.3%로 확인되었다(Table 2).

9월은 고분 내부의 최고 온도를 나타내는 시기로, 천장면과 모든 방위의 벽체에서 결로현상이 발견되지 않았다(Table 2).

### 3.2.2. 고분 내부 결로 발생 위치 예측 분석

고분 내부의 결로 발생 위치를 예측한 결과, 1월부터 4월까지의 천장면의 온도가 바닥면의 온도보다 상대적으로 낮아 천장면으로 결로가 발생될 것이라 예측되었다. 또한 1월부터 4월까지 시간이 지남에 따라 바닥의 온도가 점차 차이가 줄어들기 때문에 결로 위치가 천장에서부터 벽체 중하부까지 발생될 것이라 예측된다. 하지만 천장면과 바닥면의 온도 패턴이 변하는 6월 이후부터는 오히려 바닥면의 온도가 천장부보다 낮아져 벽체의 결로 현상은 줄어들고 바닥면에 결로현상이 발생될 것으로 예측되었다.

또한 방위별로 결로 발생 위치를 예측한 결과, 12월에서 3월까지의 남측면의 온도가 상대적으로 낮아 결로가 발생



**Figure 13.** Rate of heat flow from outdoor to main room of Songsan-ri tomb No. 6 (expected). Arrow size and thickness means amount of heat. (A) Horizontal heat flow, (B) Vertical heat flow.

될 것으로 예측되었으며, 5월에서 10월에는 온도의 양상이 역전되어 북측면에 결로가 발생될 것으로 예측된다. 이러한 현상은 현실의 남측면이 연도와 이어지는 구조로서 상대적으로 열의 흐름이 많아 연중 온도의 편차가 크기 때문으로 사료된다. 이러한 결과를 이용하여 기간별 고분내부의 수직적 결로 예측도를 작성하였다(Figure 12).

#### 4. 고찰 및 결론

고분의 경우 구조적 특성상 밀폐된 좁은 공간과 고습한 환경조건에 지속적으로 노출되므로 일반적인 문화재 보존 환경과는 다른 차이점을 갖는다. 고분의 구조적 특성으로 인해 고분 내부는 외부 환경인자로부터 차단되어 연중 낮은 온도와 높은 상대습도가 유지되는 환경적 특성이 나타난다(Chung *et al.*, 2008).

본 연구에서는 고분 내부에서 형성되는 보존환경을 보다 정확하고 미세하게 측정할 수 있는 자동계측시스템을 설치하여 2011년도부터 2012년도까지 약 1년간의 미시환경 데이터를 확보하였다. 확보된 고분 내·외부의 보존환경 데이터를 바탕으로 고분 내부에서 발생되고 있는 미시적 열 흐름을 분석하였다. 고분 내부의 온도는 연중 11-21℃의 범위를 나타내며, 약 2개월간의 격차를 두고 고분 내부가 외부 온도의 변화에 맞추어 변화되는 것을 확인할 수 있었다. 고분 내부의 수평적 온도를 비교한 결과, 고분의 내부로 진입할수록 외부로부터 열의 흐름이 적어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고분 외부로부터 유입되는 열에너지가 고분을 덮고 있는 토양층(봉분)과 다수의 출입구로 인해 열의 흐름이 차단되거나 지연되기 때문으로 판단된

다(Kim *et al.*, 2014). 즉, 고분 내부의 특수한 환경 변화는 고분을 덮고 있는 두꺼운 토양층(봉분)에서 기인하는 것으로 사료되며, 토양층이 고분 내부 온도의 변화에 완충제 역할을 해주는 것으로 예측된다(Figure 13).

또한 고분 내부에서 발생하는 미시적 열 흐름의 특성은 구조적 특성에 기인하는 것으로 사료된다. 지면과 인접한 바닥면보다 외부와 인접해있는 현실의 천장면이 외부 기상의 영향을 많이 받기 때문에, 열의 이동이 상대적으로 활발할 것으로 예상된다. 다만, 표면 온도 변화와는 달리 높이에 따른 공기의 온도 변화량은 1℃ 이상의 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 보아 외기의 온도 영향을 받은 벽체가 현실 내부의 공기에 영향을 주지는 않지만, 이 때 고분내부에 미세한 대류로 인해 열이 일부 순환되어 온도 차이가 줄어들기 때문으로 예상된다. 고분 내부 방위별 온도의 차이는 동, 서, 북측면의 경우 토양층과 직접적으로 맞닿아 있어 온도의 변화에 충분한 완충제 역할을 하지만, 남측면의 경우 연도, 전실이라는 공간으로 이어지는 방향에 위치해 있기 때문에 다른 방위보다 열전도 차이가 크게 발생하고, 이로 인해 비교적 많은 양의 열이 흡·방출되기 때문으로 판단된다. 또한 계절의 변화에 따른 고분의 방위별 일사량이 차이가 발생될 것이라 예상되며, 이로 인해 고분 내부의 온도차이도 발생되었을 것이라 예상된다.

고분에서 발생하는 연중 규칙적 온도의 변화를 바탕으로 고분 내부의 공기 중 온도와 표면 온도 분석을 통해 현실 벽체에서 나타나는 결로현상에 대하여 발생시점을 예측하였다. 송산리 6호분을 대상으로 연 5회에 걸쳐 결로현상이 발생된 전도를 계수하여 예측분석을 수행한 결과, 고분 내부의 결로현상은 크게 수직적 양상과 수평적 양상으

로 구분할 수 있었다. 수직적 결로현상의 양상은 천장부의 표면 온도가 공기 중 온도에 비해 상대적으로 낮은 시기인 1-5월에 천장부 및 벽체 상부에서 집중적으로 나타날 것으로 예측되었다. 또한 11-12월에는 바닥의 온도와 천장부의 온도 양상이 역전되어 상대적으로 낮은 표면온도의 분포를 나타내는 벽체 중하부에 집중적인 결로현상이 예측되었다. 그 외 기간인 6-10월에는 바닥면의 온도가 점차 낮아져 1-5월 사이에 이미 발생된 천정 및 벽체의 결로현상이 점차 사라질 것이라 예측되었다. 수평적 결로현상의 양상은 1-3월에 표면온도가 공기 중 온도에 비해 낮고, 다른 방위에 비해 남측면의 온도가 낮아 남측면부터 결로현상이 발생되기 시작될 것으로 예상되었으며, 방위에 따른 온도의 차이가 적은 4월 경 모든 방위에서 결로현상이 발생할 것으로 예측되었다. 6-10월에는 1-5월에 전 방위에 걸쳐 이미 발생된 결로현상이 남측면부터 점차 사라질 것으로 예측되었으며, 11-12월에는 북측면부터 결로 현상이 재발생 될 것이라 예측되었다.

2011년도 까지 가동되었던 강제순환식 항온항습기가 6호 고분의 벽화 점토 마감층에 미치는 현상을 분석하였다. 이를 위해 항온항습기 가동 전과 가동 후의 환경 변화를 분석하였다. 항온항습기는 고분 내부의 과포화된 수분을 제거하기 위해 내부 공기순환식 작동방식으로 운영되고 있었다. 항온항습기는 온도 18℃, 습도 90%로 설정되어 있었다. 설정된 90%의 습도의 경우 일반적으로 매우 높은 습도라 생각할 수 있으나, 항온항습기에서 발생되어 빠져어나오는 바람 훨씬 더욱 건조할 수밖에 없다. 더욱이 항온항습기가 가동되던 시점의 일평균 온도 및 상대습도 비교를 통해 매우 큰 편차가 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 고분 내부를 최적의 환경으로 유지시키기 위하여 설치된 기계가 오히려 고분 내부의 환경변화를 극심하게 발생시키고 있다는 것을 알 수 있었다. 특히 동일한 시기에 항온항습기에 영향을 가장 덜 받는 배수로와 현실, 연도, 전실, 전실 앞 공간의 상대습도를 비교한 결과 모두 약 4-14%까지 극심한 편차가 발생되고 있음이 확인되었다. 이는 조사 당시 가동 중이던 강제순환식 공기조화설비로는 고분 내부의 환경을 일정하게 제어할 수 없다는 것을 알 수 있었다. 또한 공기조화기를 통해 발생된 바람이 벽화의 벽체와 직접적으로 부딪치면서 벽체는 더욱 건조해 지고 이로 인한 균열 및 박락이 진행되고 있었다. 따라서 비좁은 고분 내부에서 차갑고 건조한 바람을 발생시켜 제공하는 강제순환 방식의 제습은 벽화 토벽의 극건조라는 부작용을 발생시킬 수 있다. 실제로 이러한 제습방식으로 인해 고분벽체 또

는 벽화를 건조한 상태로 유지시켜 강도 및 접착력의 저하를 지속적으로 발생시킬 것으로 예상된다. 따라서 점토 마감층으로 구성된 고분 벽화의 토벽체의 균열, 박락의 예방을 위해서는 새로운 방식의 제습방안이 요구되어진다.

고분과 벽화를 보존하기 위해서는 외부와 차단되어 있었던 본래의 환경을 유지하는 것이 중요하다. 하지만 기기를 이용한 외부 환경인자의 완벽한 차단은 현실적으로 어렵고, 벽체에서 발생하는 결로현상을 완벽하게 제어하기 힘들 것이다(Dupont *et al.*, 2007; Coye, 2011). 따라서 송산리 고분 내부에서 나타나는 일련의 보존환경 양상을 바탕으로 볼 때, 기존의 강제순환식 공기조화기는 사용을 지양하고 공기의 온도를 벽체보다 차갑게 유지시켜줄 수 있는 공간설계 및 신 개념 공조 설비가 수반되어야 할 것이다. 고분내부 공기의 온도를 벽체의 온도보다 차갑게 유지시키면서 벽체에 영향을 주지 않는 방법으로는 고분내부의 구조 및 자연대류를 이용한 방법이 있다(Coye, 2011). 현재 고분에서는 과포화된 수분이 상대적으로 차가운 전돌 표면에 결로를 발생시키고 있다. 하지만 전실공간에 공기 중 온도보다 0.5℃이하의 차가운 냉각시스템을 설치하게 되면 수분은 자연대류에 의해 냉각시스템에 포집될 것으로 예상된다. 이러한 시스템은 이미 프랑스 라스코 동굴에서 사용되고 있으며, 매우 효과적인 수분제거 방법으로 알려져 있다(Bastian *et al.*, 2010; Coye, 2011).

또한 고분내부의 최적의 공간계획 수립이 요구되어진다. 고분 내부에서 발생하는 온도 차이는 고분을 둘러싼 다량의 토양층 뿐 아니라 고분 내부에 설치된 문 또는 구분된 공간에 의해서도 일정부분 열의 흐름이 차단될 것이다. 과거 6호분 전실 앞 공간에서 전실로 들어가는 철문의 경우 오랜 기간 부식되어 제 기능을 수행하지 못하고 있었다. 또한 배수로와 고분내부를 차단하고 있는 철문의 경우도 제 기능을 수행하지 못하고 있어 외부의 환경변화를 그대로 고분내부로 전달해 주고 있다. 다행히도 2016년 김성환 등의 보고에 의하면, 현재는 기존의 철문을 모두 제거하고 기밀창호로 보완 설치한 것으로 확인되었다(Kim *et al.*, 2016). 고분 내부 문 구조 또는 공간의 안정적인 환경을 위해 외부 공기 및 유해인자의 유입 방지를 위한 완충공간(Buffering zone)이 설치되었기 때문에 향후 더욱 효과적으로 안정된 환경을 유지할 수 있을 것이라 사료된다. 향후 제습설비 및 자연공조시스템에 대한 충분한 연구 및 시뮬레이션, 그리고 제분야의 전문가와의 다양한 토의가 진행된다면 송산리 고분과 고분 벽화를 보존할 수 있는 최적의 방안을 수립할 수 있으리라 판단된다.

## REFERENCES

- Bastian, F., Jurado, V., Nováková, A., Alabouvette, C. and Sáiz-Jiménez, C., 2010, The microbiology of Lascaux cave. *Microbiology*, 156(3), 644-652.
- Chung, G.Y., Lee, N.S., Lee, T.H., Lee, S.H., Yoon, Y.K. and Jang, M.H., 2008, Conservation environmental survey of Neungsan-ri tomb, Buyeo. Research and Service Report of Buyeo-gun, 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 Gongju-si, Chungcheongnam-do Province. (in Korean)
- Chung, Y.J., Kang, H., Chung, G.Y., Chung, H.S. and Han, K.S., 2010, Conservational research of Baekje Songsan-ri tomb No. 6. Research and Service Report of Gongju-si, Chungcheongnam-do Province. (in Korean)
- Coye, N., 2011, Lascaux and preservation issues in subterranean environments. Paris, France: Editions de la Maison des Sciences de l'Homme. Proceedings of the International Symposium.
- Dupont, J., Jacquet, C., Denetiere, B., Lacoste, S., Bousta, F., Oriol, G., Cruaud, 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. *Mycologia*, 99(4), 526-533.
- Gongju National Museum, 2009, Muryeongwangneung. (in Korean)
- Han, K.S., 2011, Making technique studies of mural paintings in the No. 6 tomb of Songsanri, Gongju. *Journal of Conservation Science*, 27(4), 451-458. (in Korean with English abstract)
- Jang, S.Y. and Lee, C.H., 2013, Production and supply and demand of Songsan-ri tomb. *Journal of Korean Ancient Historical Society*, 82, 27-53. (in Korean)
- Jin, J.H. and Aum, T.Y., 2014, The setting range of thermal environmental elements and the cooling load for the conservation of mural paintings in ancient tombs, Korea. The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2014 Symposium Proceeding, 198-201. (in Korean with English abstract)
- Jun, Y.D., Lee, K.B., Jun, H.H., Ko, S.B., Park, J.Y. and Youn, U.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)
- Jun, Y.D., Lee, K.B., Ko, S.B. and Kim, H.G., 2004, Performance of HVAC System for the conservation of ancient tombs during winter season. The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2004 Symposium Proceeding, 66-66. (in Korean)
- Jung, H.S., 2011, A study on the mural painting tomb of Baekje. *The Journal of Korean Ancient History*, 61, 301-336. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.M., Lee, J.H., Yeo, M.S. and Kim, K.W., 2014, Transient analysis of thermal and humidity environment in Korean ancient tumulus. Architectural Institute of Korea, 2014 Symposium Proceeding, 34(1), 163-164. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.H., Ahn Y.S., Jo, Y.H. and Lee, C.H., 2016, A study on stability and control for proper conservation environment of Songsanri tomb complex in Gongju, Korea. 2016 Symposium Proceeding, 44, 23-24. (in Korean)
- Lee, C.H., Chung, Y.J., Han, K.S., Yeo, M.S., Lee, J.Y. and Yang, Y.S., 2014a, Development of air eco-friendly conditioning system for Songsan-ri tomb, Gongju. Research and Service Report of Gongju-si, Chungcheongnam-do Province. (in Korean)
- Lee, M.Y., Kim, D.W. and Chung, Y.J., 2014b, 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)
- Lee, N.S. 1997, Gongju Songsan-ri tombs and Baekje royal tomb. *The Journal of Paekche Research Institute*, 27, 141-164. (in Korean)
- Park, J.Y., Ko, S.B., 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. (in Korean with English abstract)
- Suh, M.C., Choi, S.W., Lee, N.S., Kim, G.H., Ku, M.H., Kang, J.M. and Lee, W.J., 2000, Conservational status of

- Songsanri tomb. The 2nd survey report of Songsan-ri tomb, Research and Service Report of Gongju-si, Chungcheongnam-do Province. (in Korean)
- 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. *Journal of Natural Science*, 7, 147-161. (in Korean with English abstract)
- Suh, M., 2001, In-situ status and conservation strategy of the Songsanri tomb site, Baekje dynasty. *Materials Research Society of Korea*, 17. (in Korean)
- Suh, M., Lee, C., Jeong, G. and Kim, D., 1997, A study on the construction method of the Songsanri tombs using geophysical exploration method. *Journal of Conservation Science*, 6(1), 61-70. (in Korean with English abstract)
- Yoon, Y.H., 2008, Sa-shin-do mural painting of No. 6 tomb in Kongju-Songsanri. *The Journal for the Studies of Korean History*, 33, 479-508. (in Korean with English abstract)
-