creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

고분 내부의 환경 분석을 통한 석실 및 벽화의 보존 방안 연구

Conservation Method for Stone Chamber and Mural Paintings through the Analysis of the Internal Environment in the Ancient Tomb

2015 년 2월

서울대학교 대학원

건 축 학 과

김 지 민

고분 내부의 환경 분석을 통한 석실 및 벽화의 보존 방안 연구

Conservation Method for Stone Chamber and Mural Paintings through the Analysis of the Internal Environment in the Ancient Tomb

지도교수 김 광 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

건 축 학 과

김 지 민

김지민의 공학석사 학위논문을 인준함

2015 년 1 월

위 원 장 _____ 인

부위원장 _____ 인

위 원 _____ 인

국문 초록

고분은 습한 내부 환경에도 불구하고 밀폐된 상태의 조건하에서 오랜 시간 유지되어 왔지만, 발굴과 함께 일반에게 공개되면서부터 무분별한 관리와 급격한 환경의 변화로 인해 미생물의 증식 등으로 열화가 진행되어왔다. 기존의 고분 보존 연구는 고분이라는 공간의 환경적 특성과 자재에 따른 보존환경을 고려하지 않고 공조기를 설치 및 운전한 결과, 고분의 훼손을 촉진시키는 결과를 가져왔다. 이에 학술적·역사적·고고학적 가치가 높은 문화재임에도, 온전하게 보존이 이루어지지 못하고 있는 고분의 보존 방안을 제시하고자 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 고분의 보존을 위해 요구되는 환경 조건과 보존환경을 조성하고 유지할 수 있는 방안을 도출 후 투습·전열 시뮬레이션을 수행하여 보존방안 적용에 따른 고분 내부 환경의 변화를 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고분의 보존 대상은 벽화로, 벽화 훼손을 방지하기 위해서는 미생물이 생장하지 않으면서 벽체가 물리적 안정성을 유지할 수 있는 환경이 조성되어야 한다. 이를 위한 환경 조건은 고분 내 벽체와 유사한 의사시료에 균주 현탁액을 접종하여 항온항습 챔버와 고분 내 배치를 통한 온·습도 조건에 따른 변화를 관찰한 연구의 결과를 참고하여 온도 15-18℃, 습도 97-99%가 유지되어야 할 것을 보존환경으로 도출하였다. 또한 강한 기류는 벽화 및 전돌의 풍화와 수분증발의 원인이 되므로 인공적인 기류를 발생시키지 말아야 한다.

(2) 공조기를 통한 환경 제어는 일반 건물과 달리 벽체 구성에 대한 정보가

불충분한 고분에서는 제어의 한계가 있으며, 높은 습도로 인해 기기의 고장 등에 따른 부작용이 발생하므로, 패시브한 방법으로 외부 환경의 영향을 차단하여 온도를 저감하여야 한다. 자연 상태에서 고분 내의 습도는 97% 이상을 유지하므로, 온도가 18℃ 이상인 기간의 온도를 낮추는 방안을 제시하였다. 단열 성능 향상, 일사 차단, 주변 환경 완화, 침기 차단하여 외부의 환경 완화 및 열을 차단해야 한다. 사람의 출입은 온·습도의 변동 및 외부 환경에의 노출 원인이 되므로 출입에 관한 운영 방안을 규정해두고 이를 준수하도록 해야 한다.

(3) 고분에 포함된 열과 수분에 따라 각 요소의 이동이 영향을 받는 고분 내 환경 변화를 분석하기 위해 전열·투습 해석 프로그램 중 WUFI Plus를 선정하였다. 기존 연구와 도면을 참고하고 부족한 부분은 보정을 통하여 모델링을 완성하였다. 앞서 제시된 보존방안의 적용 시, 온도와 습도가 안정적으로 유지되는 환경의 확보 여부와 위험기간의 온도가 기준 온도 이상으로 높아지지 않는지를 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 단열 성능 향상시키는 것이 고분의 보존을 위한 온도 조건을 만족시키는데 있어 가장 효과적이었다. 일사의 차단과 주변 환경의 완화는 내부 온도가 낮아졌고, 기밀 성능의 향상은 연교차를 감소시켰으나 보존환경을 만족시키지 못하였다. 사람 출입 시 인체의 발열로 온도가 높아지며 순간적으로 상대습도가 낮아졌다. 불가피하게 고분 내에 사람이 출입해야할 때에는 인체 발열 등의 영향을 차단할 수 있도록 하는 운영방침이 마련되어야 할 것이다.

본 연구를 통해 아직까지 명확하게 규정되어 있지 않은 고분의 보존환경에 대한 기준과 지침 수립의 기반을 마련하였으며, 연구의 결과를 바탕으로 훼손되어가는 고분의 보존을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 고분, 문화재, 보존, 미기후

학 번 : 2012-20553

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구의 배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구의 범위 및 방법 ····· 3

제 2 장 예비적 고찰 ····· 6
2.1 문화재의 보존환경 ····· 7
2.1.1 문화재의 보존 ····· 7
2.1.2 유물의 보존환경 ····· 8
2.2 고분의 보존환경 ····· 11
2.2.1 사적을 보존하기 위한 기법 ····· 11
2.2.2 고분과 고분벽화 ····· 13
2.2.3 국내 고분 보존 연구 ····· 14
2.2.4 국외 고분 보존 연구 ····· 15
2.3 소결 ····· 22

제 3 장 실측을 통한 고분의 열·수분 환경 분석 ····· 23
3.1 대상 고분 개요 ····· 24
3.1.1 송산리 6호분 ····· 24
3.1.2 보존연혁 ····· 30
3.1.3 기설 공간 현황 ····· 31
3.2 고분 내부 환경 실측 ····· 31
3.3 고분 내부 환경 실측 결과 분석 ····· 33
3.4 실측 자료를 이용한 고분의 열·수분 이동 메커니즘 분석 ····· 40
3.4.1 열·수분 이동 고찰 ····· 40
3.4.2 고분의 열·수분 이동 메커니즘 ····· 43
3.5 소결 ····· 45

제 4 장 고분의 석실 및 벽화 보존 방안 ····· 47
4.1 개요 ····· 44
4.2 고분의 보존환경 기준 설정 ····· 48
4.2.1 고분의 훼손 요인 ····· 48
4.2.2 고분의 보존환경 기준 ····· 50
4.3 고분의 벽화 및 석실 보존 방안 ····· 53
4.4 소결 ····· 57

제 5 장 시뮬레이션을 통한 보존 방안의 검증 및 선정 ····· 59
5.1 시뮬레이션 개요 ····· 60
5.1.1 시뮬레이션 프로그램의 선정 ····· 60
5.1.2 시뮬레이션 모델 ····· 62
5.1.3 시뮬레이션 케이스 ····· 67
5.2 시뮬레이션 결과 및 분석 ····· 70
5.3 소결 ····· 75

제 6 장 결 론 ····· 77

참고 문헌 ····· 81

ABSTRACT ····· 85

표 목차

<표 2.1> 사적을 보존하기 위한 기법 ····· 11
<표 2.2> 고분의 분류 ····· 22
<표 2.3> 국외 고분 보존사례 비교 ····· 23
<표 2.4> 다카마쓰즈카 고분의 석실 해체 결정 전 현장보존 방안 ····· 27
<표 3.1> 대상 고분의 보존조치 연혁 ····· 31
<표 3.2> 고분 환경 측정 장비 및 설치 위치 ····· 33
<표 3.3> 열과 수분 이동 메커니즘의 종류 ····· 43
<표 4.1> 고분 내 벽화의 훼손 요인 ····· 51
<표 4.2> 고분 내 온도 저감 방안 ····· 57
<표 5.1> 고분 해석을 위한 요소별 시뮬레이션 입력값 ····· 54
<표 5.2> 시뮬레이션 내 기상데이터 입력값 ····· 55
<표 5.3> 시뮬레이션 모델링 케이스 ····· 56
<표 5.4> 단열재 설치 및 두께 변화에 따른 봉분의 U-Value ····· 70
<표 5.5> Nominal heat gain values from occupants ····· 71
<표 5.6> 주변 환경 완화에 따른 고분 내 온도 변화 ····· 74

그림 목차

[그림 1.1] 연구 흐름도 ····· 2
[그림 3.1] 공주 송산리 고분군 ····· 27
[그림 3.2] 공주 송산리 고분군 평면도 ····· 27
[그림 3.3] 공주 송산리 6호분 도면 ····· 28
[그림 3.4] 대상 고분의 공간 구성 ····· 32
[그림 3.5] 고분 내 환경 측정 장비 설치 위치 ····· 34
[그림 3.6] 연중 6호분 현실 내 온·습도 분포 ····· 36
[그림 3.7] 연중 외기와 고분 내 공간별 일평균 온도 변화 ····· 36
[그림 3.8] 연중 고분의 현실 내 높이별 월평균 온도 변화 ····· 37
[그림 3.9] 연중 석실 내 벽체별 일평균 표면온도 변화 ····· 38
[그림 3.10] 연중 외기와 고분 내 공간별 일평균 절대습도 변화 ····· 39
[그림 3.11] 강수 후 외기와 고분 내부의 절대습도 변화 (2012년 7월 6-9일) ·· 41
[그림 3.12] 강수 후 토양수분함량 변화 (2012년 7월 6-9일) ····· 41
[그림 3.13] 건축물 자재에서 측정된 함수량에 따른 열전도율 변화 ····· 44
[그림 3.14] 고분에서 발생하는 열전달 현상 ····· 45
[그림 3.15] 고분에서 발생하는 수분이동 현상 ····· 46
[그림 4.1] 고분의 보존을 위한 온도 및 습도 조건 ····· 53
[그림 5.1] WUFI Plus 프로그램의 계산 흐름도 ····· 62
[그림 5.2] 시뮬레이션에 의한 모델링 ····· 65
[그림 5.3] 시뮬레이션 프로그램 내 물성치 입력 예시 (전돌) ····· 66
[그림 5.4] 대상 고분 모델링 후 시뮬레이션 결과 ····· 72
[그림 5.5] 봉분의 단열 성능에 따른 고분 내 온도 변화 ····· 73
[그림 5.6] 일사 차단에 따른 고분 내 온도 변화 ····· 74
[그림 5.7] 기밀 성능 향상에 따른 고분 내 온도 변화 ····· 76
[그림 5.8] 재실 시간 및 빈도에 따른 습도 변화 ····· 78

[그림 5.9] 재실 시간 및 빈도에 따른 온도 변화 ····· 78

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

문화재란 인위적, 자연적으로 형성된 국가적, 민족적, 세계적 유산으로 역사적, 예술적 또는 학술적, 경관적 가치가 큰 것으로 문화재를 보존하여 민족문화를 계승하고, 이를 활용할 수 있도록 함으로써 국민의 문화적 향상을 도모함과 아울러 인류문화의 발전에 기여해야 할 것이다.[1] 문화재를 보존하여 온전한 상태로 후손에게 물려주는 것은 문화유산헌장에도 정하고고 있는 오늘날을 살고 있는 우리들의 책임이자 의무이다.[2]

많은 문화재는 고분의 발굴과 함께 출토되어 왔다. 고분은 일정한 양식을 갖춘 특정한 시기의 무덤으로, 삼국시대의 문화, 사회상을 파악하는데 있어 표지적 존재가 되는 학술적·역사적·고고학적 가치가 높은 문화재이다. 특히 벽화고분은 다양하고 풍부한 묘실 구조, 다채로운 벽화 내용을 통한 당시의 문화와 풍습, 과학적 기술의 발전 등을 연구하는데 있어 귀중한 자료를 제공하여 역사적 가치가 높다.[3] 그러나 고분에서 출토된 유물은 박물관의 수장고와 전시실에서 보존 및 전시되지만, 발굴된 고분의 보존에 대해 고려되지 않아 온전하게 보존되지 못하고 있다.

밀폐된 상태로 보존되던 고분은 발굴 이후 무분별한 관리와 급격한 환경의 변화를 겪으며 열화가 진행된다. 열화는 시간의 경과와 함께 주위 환경의 화학적·물리적 작용으로 재질이 저하되는 현상으로, 고분의 보존을 위해서는 열화의 진행을 최소한도로 줄일 수 있는 환경조건을 유지하는 것이 중요하다.[4]

---

1) 법제처, 문화재보호법, 법률 제11228호, 2012.
2) 이오희, 『문화재 보존과학』, 서울: 주류성, 2009, p. 243.
3) 김기웅, 『고분』, 서울: 대원사, 1991, p. 6-8.
4) 강대일, 문화재와 보존환경, 보존과학기초연수교육, 국립문화재연구소, 2003, p. 91.

기존의 고분 보존 연구는 고분이라는 공간의 환경적 특성과 자재에 따른 보존 환경을 고려하지 않고 공조기를 설치 및 운전한 결과, 고분의 훼손을 촉진시키는 결과를 가져왔다.

본 연구에서는 문화재 중 고분의 보존에 있어, 보존을 위한 적합한 환경조건을 알지 못하는 것과 외부환경에 노출된 상태에서 수장고와 같은 항온·항습 상태를 조성하기 힘든 특성을 문제점으로 상정하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 문화재 보존환경에 관한 연구와 기존의 고분 보존 연구 사례를 고찰하여 고분의 보존을 위한 환경 조건을 도출하고, 고분에서 발생하는 열과 수분의 이동 현상을 분석하여 보존환경을 조성할 방안을 제시하고자 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 문화유산 중 외부환경에 노출된 상태에서 보존되어야 하는 고분의 보존 방안을 제시한다. 이를 위해, 고분의 온·습도 환경을 바탕으로 고분의 열·수분 이동 메커니즘과 보존을 위해 요구되는 환경조건을 도출하였고 이를 바탕으로 보존을 위한 환경조건을 만족할 수 있는 방안을 마련하였다.

이상에서 서술한 본 연구의 범위 및 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

(1) 문화재의 보존에 관한 예비적 고찰

본 연구의 목적을 달성하기 위하여 우선 문화재의 보존에 대한 연구 사례를 통하여 문화재의 훼손 인자, 보존을 위한 환경 조건에 대하여 분석하였다. 또한 기존의 고분 보존 사례를 통해 고분의 보존환경, 보존 실패 요인을 살펴보았다. 이를 바탕으로 고분 보존을 위한 적합한 환경의 조건을 분석하였다.

(2) 실측 자료를 이용한 고분의 열·수분 이동 메커니즘 도출

고분의 축조 방식, 정비 및 공조기 설치 연혁, 내부 공간의 변화를 비롯하여 고분 내부의 환경 변화를 분석하여 고분의 온·습도 환경을 이해하였다. 이를 바탕으로 외부 환경의 변화가 고분 내부의 환경에 어떤 영향을 미치는지 주요 인자를 파악하였다.

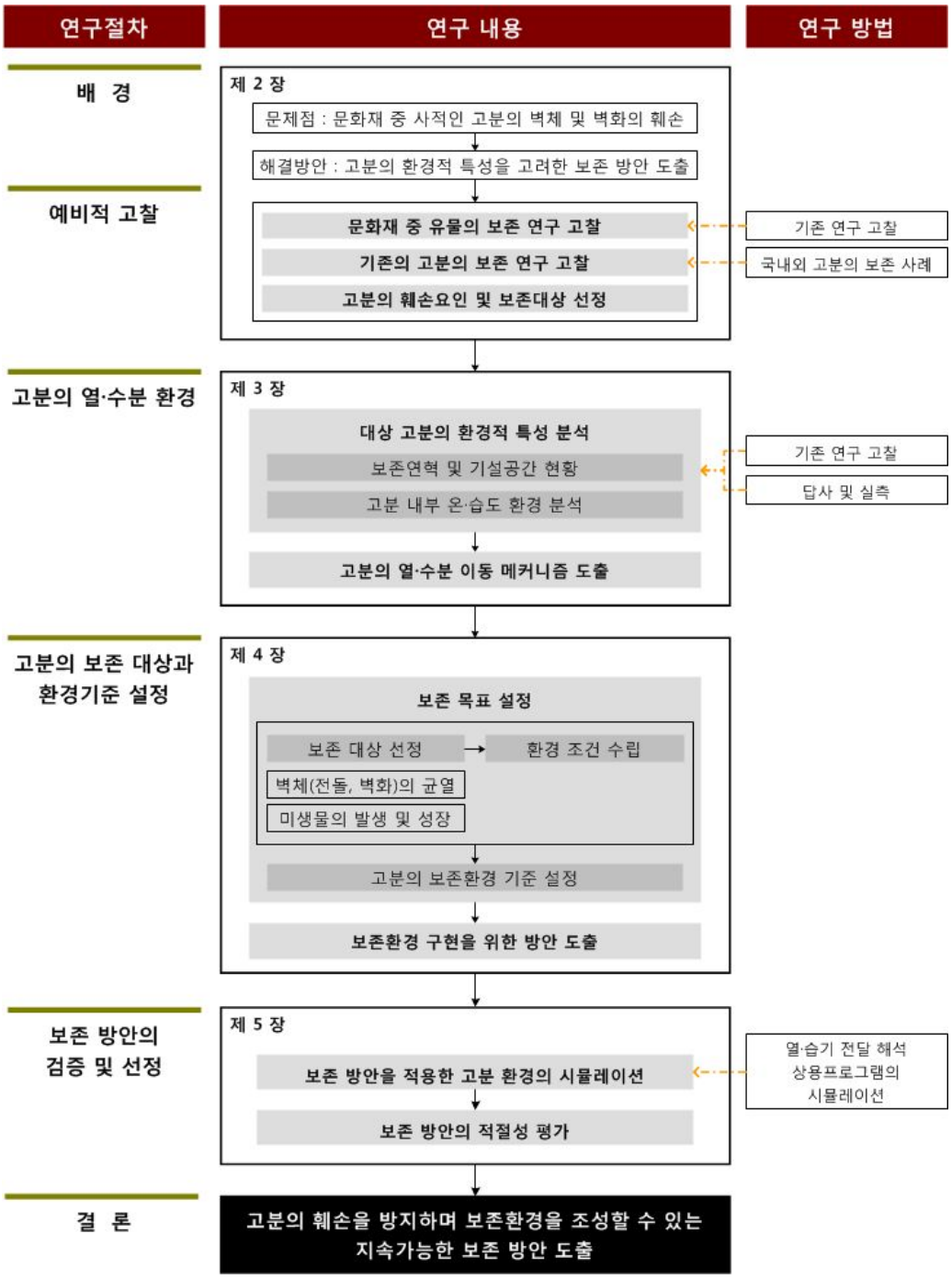
(3) 고분의 보존을 위한 환경 조건의 분석과 보존 방안 도출

고분 내의 미생물 제어와 벽화의 물리적 안정성을 위한 요구 조건을 참고하여 고분의 보존환경을 정리하였다. 앞에서 고찰한 문화재의 보존환경과 대상 고분의 환경 실측을 바탕으로, 고분 보존 방안을 제안하였다.

(4) 시뮬레이션을 통한 고분 보존 방안의 효과 검증

도출된 고분 보존 방안의 적용 효과에 대해 열·수분 해석 시뮬레이션 프로그램인 WUFI Plus를 이용하여 검증한다. 문화재의 특성상 봉분을 포함한 고분 전체의 원형 상태를 보존할 수 있는 방안으로 케이스를 나누었다.

이상과 같은 본 연구의 범위 및 방법에 의한 진행을 연구 흐름도로 나타내면 [그림 1.1]과 같다.


연구절차
연구 내용
연구 방법
배 경
제 2 장
문제점 : 문화재 중 사적인 고분의 벽체 및 벽화의 훼손
해결방안 : 고분의 환경적 특성을 고려한 보존 방안 도출
예비적 고찰
문화재 중 유물의 보존 연구 고찰
기존의 고분의 보존 연구 고찰
고분의 훼손요인 및 보존대상 선정
기존 연구 고찰
국내외 고분의 보존 사례
고분의 열·수분 환경
제 3 장
대상 고분의 환경적 특성 분석
보존연혁 및 기설공간 현황
고분 내부 온·습도 환경 분석
고분의 열·수분 이동 메커니즘 도출
기존 연구 고찰
답사 및 실측
고분의 보존 대상과 환경기준 설정
제 4 장
보존 목표 설정
보존 대상 선정
환경 조건 수립
벽체(전돌, 벽화)의 균열
미생물의 발생 및 성장
고분의 보존환경 기준 설정
보존환경 구현을 위한 방안 도출
보존 방안의 검증 및 선정
제 5 장
보존 방안을 적용한 고분 환경의 시뮬레이션
보존 방안의 적절성 평가
열·습기 전달 해석 상용프로그램의 시뮬레이션
결 론
고분의 훼손을 방지하며 보존환경을 조성할 수 있는 지속가능한 보존 방안 도출

[그림 1.1] 연구 흐름도

제 2 장 예비적 고찰

문화재를 보존하는 것은 민족문화를 계승하고, 이를 활용할 수 있도록 하여 국민의 문화적 향상을 도모하고 인류문화의 발전에 기여하는 것[1]으로 문화유산을 잘 보존하여 후세에 전승하는 것은 당연한 의무라 할 수 있다. 수장고나 보존시설이 아닌 현장에서 보존이 되어야 하는 고분은 그 보존에 대한 연구가 충분히 이루어지지 않아 지금도 훼손이 이루어지고 있다. 고분을 보존하기 위해서는 고분에서 일어나는 훼손 현상이 무엇인지 알고 훼손의 진행을 멈추기 위해 요구되는 환경 조건을 분석하고 안정적으로 그 환경을 조성해주어야 한다. 본 연구에서는 습한 내부 환경으로 인해 미생물이 생장하고 적합하지 않은 공조기기의 설치로 인해 벽화가 오염 및 탈락되고 있는 고분의 보존 방안을 도출하고자 한다. 따라서 본 장에서는 먼저 문화재 중 일반적인 유물의 보존환경에 대해 고찰한 후 고분에 관련한 일반적인 내용에 대해 검토하고자 한다.

문화재는 만들어진지 오랜 시간이 지나 일반적인 공조 환경에서는 쉽게 손상이 발생할 수 있다. 고분은 일반적인 건축물과 달리 두꺼운 봉분으로 덮여 있으며, 이는 지하공간과 유사한 습하고 온도 변화가 적은 환경적 특성을 나타내게 된다. 기존의 문화재 보존에 관한 연구를 통하여 고분의 보존 방안에 대해 고찰하고 기존 보존 방안의 한계를 밝혔다.

1) 법제처, 문화재보호법, 법률 제11228호, 2012.

2.1 문화재의 보존환경

본 장에서는 문화재 보존에 관한 기존 연구를 고찰하여 고분 보존 방안 마련을 위한 기초적인 연구를 하고자 하였다. 문화재의 보존에 대해 알아보고 보존 중에서도 문화재의 수명을 연장시키는 수동적인 보존에 초점을 맞추어 기존의 유물의 보존을 위한 연구 및 환경조건을 살펴보았다.

2.1.1 문화재의 보존

본 장에서는 문화재 보존의 의미와 유물의 훼손요인 및 그에 따른 보존을 위한 연구 결과에 대해 고찰하였다.

전 대영박물관 보존연구소 소장 Dr. Oddy는 그의 저서 『The Art of Conservator』에서 보존(conservation)을 다음과 같이 정의했다.

> 「오랜 기간이 흐른 뒤에도 작품이 그 원형을 지킬 수 있도록 적절한 환경을 제공하고 작품의 원형을 보존하는 목적으로, 원래의 상태를 훼손하지 않고 복원되거나 수리하는 새로운 물질을 최소화하는데 노력한다.[4]」

그리고 보존을 능동적(active), 수동적(passive)인 두 가지 형태의 보존활동으로 나누어 보았다. 능동적 보존활동은 작품의 상태를 과학적으로 평가한 후, 더 이상의 손상을 억제하기 위한 처리과정으로 세척, 수복, 그리고 필요에 따른 여러 가지 복잡한 과정을 포함시켰다. 수동적인 보존활동으로는 올바른 보관과 전시환경의 조성을 통하여 작품의 생명을 연장시키는 과학적 연구(preservation)를 포함시켰는데, 이것을 보존환경이라 말한다.[5]

---

4) 이오희, 문화재 보존과학, 주류성, 2009, p. 34.

2.1.2 유물의 보존환경

유물은 각 재질에 적합한 보존환경을 설정하고 적절한 온·습도의 조건을 유지해주지 않으면 보존처리를 통해 수리·복원되었더라도 노화와 파손이 일어날 수 있다. 본 장에서는 고분의 보존환경에 대해 고찰하기에 앞서 유물의 보존에 방법을 고찰하였다.

유물은 과거의 인류가 남긴 이동이 가능한 유형의 제작품으로, 일반적으로 전시 등에 활용하기 전까지 박물관의 수장고에 격납되어 보관된다. 최근의 전시시설 및 수장시설은 대부분 폐쇄된 공간 내에서 인공적으로 온·습도 및 조명·채광을 조절하는 경향이 있으므로 온·습도 및 조명·채광 등의 기준을 어떻게 둘 것인가가 시설의 설계에 있어 크나큰 과제가 된다.[6]

유물에 훼손을 일으킬 수 있는 위협요소로 상대습도(relative humidity), 온도(temperature), 공기 오염(air pollution, contaminants), 해충 침입(pest infestation), 충격 및 진동(shock and vibration), 자연재해(natural emergencies), 건물 및 기계 설계 오작동(building and mechanical design malfunctions), 도난 및 파손(theft and vandalism)가 있다.[7] 앞서 언급한 보존환경을 조성하기 위해서는 열화의 진행을 최소한도로 줄일 수 있는 환경조건을 유지하는 것이 중요[8]하며, 수장고의 요구 환경은 아직까지도 완전히 정해지지 않았으나 재질에 따라 다르다.[9] 유물의 재질별 적정 온도와 습도는 <표 2.1>[10][11]에 제시하였으며, 온도와 습도의 영향은 다음과 같다.[12]

---

5) 이오희, 문화재 보존과학, 주류성, 2009, p. 35.
6) 국립민속박물관, 박물관과 유해생물 관리, 서울: 국립민속박물관, 2008, p. 40.
7) ASHRAE, 『2011 ASHRAE Handbook HVAC Applications』, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioing Engineers, 2011, p. 23.2.
8) 강대일, 문화재와 보존환경, 보존과학기초연수교육, 국립문화재연구소, 2003, p. 91.
9) ASHRAE, *op. cit.*, pp. 23.2-23.3.
10) UNESCO 1956 "Protection of Cultural Property in the Event of Armed Conflict" by A.Noblecourt. (문화체육부, 박물관 내 전시 및 수장 공간의 공조환경 기준 연구(연구보고서), 대한민국 문화체육부, 1996, p. 83에서 인용).
11) ICOM, 국제 박물관 회의 질문에 대한 각 기관의 회답, 1960. (Ibid., p. 83에서 인용).

(1) 온도

유물의 재질 열화는 일반적으로 저온에서보다 고온에서 촉진되므로, 보존상 적당한 온도는 저온이 양호하다고 알려져 있으나 지류나 섬유류 등과 같이 적당한 수분을 함유하고 있어야 하는 것도 있다. 하지만 수분은 영하의 온도에서 동결할 수 있으며 동결과 융해가 반복되면 조직의 파괴 등 재질에 악영향을 미치게 되므로 영하 이하의 온도로 낮추어서는 안 된다.

(2) 상대습도

습도는 유물의 노화속도를 촉진시키며 기계적, 물리적, 화학적인 반응을 통하여 가수분해 현상이 발생한다. 특히 종이류, 섬유류, 목재류 등은 습도 변화에 민감하게 작용하므로 세심한 관리가 필요하다. 또한 습도는 곤충의 서식, 곰팡이 발생 및 박테리아의 증가 등 부가적인 유물의 피해에 직접적인 영향을 끼치므로, 박물관 유물의 보관 및 전시에 있어 습도 조건 설정의 중요성인 인식되어 왔다.

12) Ibid., pp. 81-84.

2.2 고분의 보존환경

본 장에서는 2.1에서 고찰한 문화재의 보존환경을 바탕으로 사적에 해당하는 고분의 보존환경에 대해 살펴보았다.

공조시스템을 이용하여 고분을 보존하기 위해서는 고분 보존을 위한 환경조건이 도출되어야 공조 전략 및 공조시스템을 선정할 수 있다. 하지만 우리나라 문화재 보존을 위한 환경조건은 고분과 같이 외기온에 영향을 많이 받는 곳에 있는 것이 아닌, 기밀과 단열이 잘된 일반 보존 시설 건물 안에서 문화재를 보존 했을 때의 설정 온도와 습도만이 제시되어 있을 뿐이다. 따라서 고분 혹은 동굴과 같은 구조체에 그려진 벽화 등의 문화재를 보존하기 위해서는 어떠한 온습도 환경이 요구되는지 고분 내지 벽화보존과 관련된 국외 사례를 조사하였다.

2.2.1 사적을 보존하기 위한 기법

매장문화재 중 유물은 발굴이 종료된 후 전시실이나 수장고에서 보관되며 그에 대한 보존처리가 체계화되어 있지만, 대부분의 발굴된 유구에 대한 보존방법은 아직 체계화되지 않아 사진과 기록만 남기고 파괴되거나 보존·복원되어도 많은 문제점이 발생하고 있다.[1)]

사적의 정비기법은 '사적을 보존하기 위한 기법', '사적의 가치를 알리고 나타내기 위한 기법', '관람객의 교육 및 안내와 편의시설 설치를 위한 기법', '사적과 관람객의 안전을 도모하는 시설의 설치를 위한 기법'이 있으며, 이 중 사적을 보존하기 위한 기법은 <표 2.2>[2)]와 같다. 보존처리와 보존환경 개선으로 구분할 수 있는데, 이는 2.1.1에서 언급된 능동적 보존과 수동적 보존의

1) 안진환, "발굴유구 보존에 대한 연구", 영남대 대학원 석사학위 논문, 2008, pp. 6-7.
2) 김철주, 『사적의 보존관리와 정비의 이해』, 눌와, 2013.

분류와 유사한 의미를 가진다. 유물과 마찬가지로 보존처리를 통해 복원이 되었을지라도, 보존환경이 만족되지 못하면 다시 훼손이 진행될 수 있다. 그 외에도 가역성을 갖춘 기술을 사용하여야 하며, 보존과학적 기술을 적용하기 전에 직·간접적으로 시험을 실시할 것을 권하고 있다.

<표 2.1> 사적을 보존하기 위한 기법

구분	내용
보존처리	열화 및 풍화, 파손이 진행되는 속도를 억제하거나 방지할 목적으로 유적 및 유구 자체에 실시 유적 및 유구의 소재(토양, 석재, 목재 등)로 인한 차이와 열화 및 풍화, 파손의 원인과 정도 등에 따라, 보존과학적인 수법에 의한 재질의 강화처리방법과 공학적 기법에 의한 구조보강으로 분류 - 보존과학적인 수법에 의한 재질의 강화처리방법: 적절한 수지의 도포 또는 주입을 통한 강화처리기법을 포함하여, 파손된 부재를 접착제로 접합하는 수법 등 - 공학적 기법에 의한 구조보강: 앵커볼트 등을 이용하여 파손된 부재를 접합하는 기법을 포함하여 조립구조재를 외측에서 보강하기 위해 실시하는 지지보강공사 등
보존환경 개선	유적 및 유구의 훼손 또는 파괴를 억제하기 위해 주변 환경을 개선하고 보존이 가능한 조건을 갖춤 성토, 적절한 배수시설의 설치, 유구에 미치는 식생환경의 영향, 주변을 통과하는 도로 및 통과 차량 등이 미치는 소음 또는 진동 등의 악영향, 관람객의 통행이 미치는 영향 등

2.2.2 고분과 고분벽화

고분의 보존 방안을 도출하기 위해서는 보존 대상인 고분의 구조 및 구성, 벽화의 기법 등에 대한 이해가 요구된다.

(1) 고분

고분은 봉분의 재료, 봉분의 형태, 관의 재료, 석실의 형태 등 여러 기준에 따라 분류할 수 있다. 고분의 보존을 위해서는 봉분의 재료와 형태, 석실의 재료 등 고분에 포함된 각 구성 요소의 보존환경에 대한 탐색이 선행되어야 한다. 벽화고분을 비롯하여 일정 규모 이상의 고분은 내부의 미시환경을 분석하여 고분 내 미시환경이 벽화의 손상에 미치는 영향에 대한 조사가 요구된다.

(2) 고분벽화

고분의 벽화는 채색층, 바탕의 백회층, 돌벽으로 구성된다. 각 구성요소의 상호 관계에 대한 세밀한 검토와 분석, 채색층 시료의 분석과 종합을 전제로 보존 방안이 마련되고 실행되어야 한다.[3)]

벽화의 제작 방법은 벽면에 직접 그림을 그리거나 바탕층(회)을 칠한 후 그리는 방법으로 분류할 수 있고, 제작 방법에 따라 훼손 원인과 보존환경이 달라진다. 화장지법은 채색을 회가 마르기 전·후에 하는지에 따라 건지벽화법(乾地壁畵法, seko)과 습지벽화법(濕地壁畵法, fresco)으로 분류한다. 바탕층을 칠한 후 벽화를 그리는 화장지법의 경우 채색층의 탈락 외에도 바탕층의 탈락을 고려해야 한다.

---

3) 전호태, 북한 소재 고구려 고분벽화의 보존과 관리방안 연구, 한국고대사 연구, 2004, 35, pp. 104-107.

2.2.3 국내 고분 보존 연구

국내에서 고분에 관한 연구는 보존해야 할 대상이 아닌 관광자원의 차원에서 어떻게 정비를 할 것인지에 대해 이루어져왔다(강종원, 2002; 윤지향, 2006; 김철주, 2012; 김경대, 2013; 이주헌, 2013). 그로 인하여 아직까지 고분의 보존에 대해서는 많은 고려가 이루어지지 않았으며, 특히 벽화고분들의 경우 대부분 벽화가 존재했던 흔적만 남아있는 상태이다.

영주 순흥 벽화 고분(사적 제313호)의 발견 당시, 다습한 환경임에도 밀폐된 장소로 빛이나 온습도의 변화가 없었고, 공기의 새로운 보급도 없었기에 형태를 잘 보존[4]되어 있었으며, 보존 작업 중 온도가 높아져 습도가 낮아지자 가습기를 가동[5]하였다는 기록이 있으나 이후 보존에 대한 연구를 이루어지지 않았다.

공주 신관리 석실 고분(충청남도 기념물 제7호)을 대상으로 고분 내의 최적 공기조화 시스템 개발 연구[6]에서는 고분의 보존을 위해 기류의 유입과 배출 유속을 통제하여 고분의 입구와 본실의 온도와 고분 내 습도를 일정하게 유지하는 것을 목표로 하였다. 고분 내 환경 자료 및 실물 실험이 이루어졌다. 그러나 봉분을 통한 물질 이동을 고려하지 않았고, 일반적인 유물의 보존조건을 제어조건(21±2℃, 55±3%)으로 공조시스템을 운전하는 한계가 있었다. 또한 공조시스템 적용에 따라 습도를 낮출 수 있다는 결론을 제시했으나 평균 제습량이 시간당 258.4ml로 실험에 사용한 항온항습 시스템의 제습용량의 약 7배로 나타났다.

---

4) 강대일, 문화재와 보존환경, 보존과학기초연수교육, 국립문화재연구소, 2003, pp. 90-119.
5) 김병호, 정형균, 순흥읍내리 벽화고분 보존처리, 보존과학연구, 1986, v7, pp. 264-274.
6) 과학기술부, 공주대학교, 고분 내의 최적 공기조화 시스템 개발(연구보고서), 2005

2.2.4 국외 고분 보존 연구

국내의 고분 보존 사례에 이어 국외의 고분 보존에 관한 사례 및 기준을 조사하였다. 일본 다카마쓰즈카 고분과 프랑스 라스코 동굴(Lascaux cave), 중국 둔황 막고굴의 보존에 대해 고찰하였다. 다카마쓰즈카 고분과 라스코 동굴은 보존에 실패하였으나 공조기를 통해 고분 내부 보존을 시도한 사례에 해당한다. 각 고분의 보존 사례는 <표 2.3>과 같다. 외국의 보존사례에서도 결국 현장보존에는 실패하였고, 각 고분은 모두 발굴 후 온도 상승으로 인한 미생물 발생과 공조기 설치 시 제어가 잘 되지 않았으며 수리 과정에서 외부 환경에 노출되며 더 심각한 훼손이 발생하였다.

둔황 막고굴과 달리 지하에 있는 다카마쓰즈카 고분과 라스코 동굴의 경우 외기에 의한 고분 내부의 환경 변화 양상이 비슷하였다. 두 고분 모두 봉분의 축열 효과에 의해 고분 내부의 온도는 연교차가 적었고 몇 개월의 시간지연을 보였다. 고분 내부의 상대습도는 외기의 상대습도와 관계없이 연중 99-100%의 높은 습도를 유지하였는데, 이는 자재와 자재를 둘러싼 토양의 높은 수분 함수율이 원인인 것으로 여겨진다.

<표 2.2> 국외 고분 보존사례 비교

항목	다카마쓰즈카 고분	라스코 동굴	둔황 막고굴
위치	일본 나라현 다카이치군 아스카촌 북위 34.78°	프랑스 끌레르몽페랑(Clemont-Ferrand) 북위 45.05°	중국 간쑤성 둔황현 남동쪽 북위 40.09°
주변 기후	온대다우 기후	대륙성, 지중해성, 해양성 기후	사막기후
고분 내부 온・습도	18℃, 95-100%	12℃, 95-100%	14℃, 20-50%
벽화 채색방법	응회암 강력암 위에 두께 2-3mm의 회반죽 칠 후 벽화 채색	석회암으로 이루어진 동굴 내 채색	건식 프레스코 화법 (역암 위 얇은 진흙으로 바탕칠 후 벽화 채색)
훼손상태	석실과 전실 사이 취합부에서 발생한 곰팡이가 석실로 전이됨 벽화 탈락	다수의 방문객 출입으로 인한 이산화탄소 생성으로 손상 결로 발생으로 인한 곰팡이 발생 보존을 위해 설치한 시스템의 교체 작업 중 심각한 곰팡이 발생	외기의 습도가 높아질 때 역암이 용해되어 방해석을 형성하며 벽화 탈락
시도된 보존방법	건조로 인한 벽화 탈락을 고려하여 습도를 제어하지 않고 석실 주변 온도를 봉토 온도와 같도록 전실을 공조함 현장 보존이 어렵다는 판단 하에 석실해체 후 보존시설 내에서 보존	벽화에 결로가 생성되지 않도록 동굴 내부 기계실로 결로 발생을 유도 관람을 위한 복제 동굴 축조	건조한 상태를 유지할 수 있도록 사람의 출입을 제한

(1) 다카마쓰즈카 고분

일본 나라현에 위치한 다카마쓰즈카 고분은 응회질의 강력암 위에 두께 2-3mm의 회반죽을 바탕으로 덮은 후 그 위에 극채색의 벽화를 그린 고분이이다. 고분이 축조된 시기는 약 5세기에서 6세기로 여겨지고 있으며, '아스카미인(飛鳥美人)'이라는 그림을 포함하여 역사적으로 보존의 가치가 높게 평가되는 벽화가 존재하고 있다. 1972년에 발굴되어 현장에서 보존되어왔으나, 2005년에 다카마쓰즈카 고분 대책 위원회에서 현장보존이 어렵다고 판단하여 고분을 해체하기로 결정하였고 2007년 석실을 해체하여 보존시설에서 보존되고 있다.

다카마쓰즈카 고분의 보존은 봉본의 온도 상승을 방지하는 것에 초점이 맞춰져 있었다. 최초의 현장보존시설은 발굴을 위해 개토한 남측에 전실 및 준비실을 건설하고, 전실을 냉각용 동판복사패널을 이용해 봉토 온도와 같게 공조하여 남측에 봉분이 덮혀 있는 것과 같은 효과를 내도록 한 것이다.[1] 현장보존시설은 석실의 해체 보존이 결정될 때까지 약 25년간(1975-2004) 운영되었다.

석실 내부를 직접 공조하지 않고 전실만을 공조하는 시스템을 적용한 것은 석실을 직접 공조 할 시 취출되는 공기로 인한 벽화의 탈락을 우려했기 때문이다. 전실의 천장, 벽, 바닥을 두른 동관 패널 온도를 전실과 석실의 취합부 온도와 동일하게 해주었다. 또한 벽화 수리 및 보존 작업을 위해 작업자가 석실로 출입을 할 경우에는 석실 내 온도가 인체의 발열 및 기기 등에 의하여 석실 내 온도가 상승할 것으로 고려하여 전실과 석실사이의 문을 열어놓고 전실에서 에어컨을 가동하여 인체 및 기기에 의한 발열을 제거하였다.

2001년 전실과 석실 사이의 취합부에서 발생한 곰팡이가 석실로 전이되면

1) Ishizaki, T., Miura, S., & Inuzuka, M., Thermal and Moisture Characteristics of Takamatsuzuka Tumulus Mound and its Cooling, 2008, pp. 17-22.

서 다카마쓰즈카 고분 대책 위원회는 보존방안 도출을 위한 원인을 분석하였다. 다카마쓰즈카 고분의 보존 실패 요인은 발굴 초기에 비해 취합부의 온도가 급격하게 상승하여, 취합부의 온도로 제어되는 전실 온도가 석실 온도를 상승시켜 곰팡이 번식에 좋은 환경을 만들어준 것으로 판단되었다. 따라서 다카마쓰즈카 고분 대책 위원회는 현장 보존이 어렵다는 판단 하에 2005년 석실을 해체 보존하기로 결정하였고 현장보존시설은 모두 폐기되었다.

석실 해체를 하는 동안의 훼손을 방지하기 위해 <표 2.4>[2)]와 같은 현장보존 방안을 제안하였고, 이 중 석실 주변의 봉분에 냉각 파이프를 삽입하고 봉분 위에 가건물을 설치하고 온도 10℃, 상대습도 90%, 취출속도 0.1m/s의 제어조건으로 공조하여 해체 작업 동안 석실 내부의 온도가 높아지지 않도록 하여 안전하게 석실을 해체하였다.

<표 2.3> 다카마쓰즈카 고분의 석실 해체 결정 전 현장보존 방안

보존 방안	발생가능한 문제점
석실 남측에 냉각 바람 유입	냉각을 위한 열교환기의 효율을 올려주게 되면 석실 내 송풍량을 증가시켜야하기 때문에 벽화에 훼손이 우려됨
석실과 전실 사이 취합부 냉각	취합부에 차가운 공기를 보내는 방식으로, 시뮬레이션 결과 석실 내 온도가 15℃로 낮아지더라도 공간의 균일한 온도 감소 효과가 없어 석실 내부 결로 발생 증감
석실 주변에 냉각 파이프 삽입	석실을 균일하게 냉각시키고, 갑작스런 온도의 변화를 방지할 수 있으나 봉분을 훼손할 수 없어서 사용 못함
봉분 위 냉각시트 설치	시뮬레이션을 통해 석실 내 온도를 15℃로 낮추는 것이 불가능하다고 판단함

2) Ishizaki, Takeshi, Chie Sano, Sadatoshi Miura, Study of temperature and humidity in the stone chamber of Takasatsuzuka Tumulus and water profile in the surrounding mound, Science for conservation, 43, 2004, pp. 87-94.

(2) 라스코 동굴

라스코 동굴은 프랑스 남서쪽에 있는 동굴로, 기원전 15,000-13,000년경에 그려진 것으로 추정되는 후기 구석기 시대의 벽화들이 존재한다. 동굴은 석회암으로 이루어져 있으며, 벽화가 그려진 동굴들이 중심축이 되는 동굴로 합쳐지는 형상으로 총 길이를 합쳤을 때 약 250m정도 되고 동굴의 높이는 평균 4m 정도이다. 벽화는 고고학자와 인류학자들에 의해 크게 다섯 개의 갤러리로 구분되며, 그 중 입구에서부터 '황소가 있는 갤러리(Bulls Hall)'가 대표적이다.[3]

발굴 초기, 일반에 동굴 내부를 공개하였으나 다수의 방문객 출입으로 인한 이산화탄소 생성으로 인해 벽화가 손상되었고, 이후 1963년부터 보존을 목적으로 동굴을 폐쇄하였다. 1983년 라스코 동굴에서 200m 정도 떨어진 곳에 일부 갤러리를 복제한 동굴을 관람을 위해 만들어 일반에게 공개 개장하였다.

라스코 동굴은 일반에 폐쇄 이후 보존을 위해 1965년에 'Climate Control System'을 설치하여 1999년까지 운영했다. 출입구와 가까운 곳에 위치한 Bulls Hall과 Axial Hall Gallery가 외부 기온의 영향을 많이 받았으며, 그에 따라 결로가 쉽게 발생했으며 수분의 침투도 잦았다. 'Climate Control System'은 동굴 내부의 환경을 급격하게 변화시키지 않으면서 공기의 자연대류를 통해 온도와 습도를 조절하고 기계실로 결로를 유도하여 벽화 표면에 결로가 맺히는 것을 방지했다.[4]

겨울철 외부의 차가운 공기가 동굴 내부로 유입되었을 때 나타나는 현상을 관찰하였을 때, 외부에 비해서 온도가 높은 Bulls Hall과 Axial Hall Gallery

---

3) Ruspoli, M., 『Lascaux, un nouveau regard』, Paris: Bodas, 1986. (우성주, 구석기 시대 라스코 동굴벽화의 인물이미지 연구, 지중해지역연구, 2010, 12(4), p. 135에서 인용).

4) Malaurent, P., Brunet, J., Lacanette, D., & Caltagirone, Contribution of Numerical Modelling of Environmental Parameters to the Conservation of Prehistoric Cave Paintings - the Example of Lascaux Cave, Conservation and Management of Archaeological Sites, 8(2), 2006, pp. 59-76.

내의 공기 중에 포화되어 있는 상대습도가 외부의 차가운 공기로 인해 결로가 맺히는 현상을 줄여준다는 것을 관찰하였다. 바닥의 따뜻한 공기가 상승하면서 대류현상이 발생하여 결국에는 벽화가 있는 높이의 온도가 빠르게 안정화되는 것도 관찰되었다.[5] 이러한 관찰을 통해 입구 아래에 위치한 기계실의 온도를 낮춰 결로를 유도하고, 열교환기를 설치하여 공기를 자연대류 시켜서 Bulls Hall과 Axial Hall Gallery 내의 온도와 습기가 조절되는 안을 도출해 내었다. 이 설비를 설치하기 위한 Primary Cooling System은 동굴 바깥에 설치하고, Secondary Cooling System만 동굴 내 기계실에 설치하여 공조시스템의 발열로 인한 영향을 최소화할 수 있도록 설계하였다. 또한 'Climate Control System'의 운전 하에서 동굴을 안정적으로 운영하려면 하루 동안에 35분간 5명의 방문자를 수용할 수 있다는 결론을 도출해 내었다.[6]

2000년대에 노후화된 'Climate Control System'을 교체하기 위한 작업 이후에 동굴 내에 제거하기 어려운 심각한 곰팡이가 발생하였다. 곰팡이의 발생 원인은 잠재해 있던 곰팡이가 재발한 것과 시스템 교체 작업 시 미생물 방지 대책이 미흡해서 발생한 것으로 보는 의견이 있다. 현재 교체된 시스템으로는 곰팡이 발생을 제어하기 어려운 상황이다.

(3) 둔황 막고굴

둔황 막고굴은 중국 둔황시 명사산 동쪽 벼랑에 남북으로 1600m에 걸쳐 조성된 600여개의 동굴 안에는 2400여개의 불상과 벽화가 그려져 있다. 기원전 전한 시대 불교 유물부터 당나라 후기까지의 불교 유물들이 크고 작은 동굴 내부에 시대별로 폭넓게 존재하고 있다. 1987년 유네스코 세계문화유산

5) Paul Marie GUYON, Climatomology problems in Lascaux. Reflections on my visit to the cave 13 novembre 2009 (Project report), 2009, pp. 1-14.
6) Ibid.

에 등재되어, 국제적으로 막고굴에 대한 벽화 보존 연구와 대책이 꾸준히 진행되고 있다.

둔황 막고굴의 경우, 동굴이 절벽으로부터 가까운 곳에 있기 때문에 외기의 영향을 많이 받고 있다. 건조한 사막 기후로 평소에는 안정적인 보존환경을 유지하지만, 외기의 상대습도가 높아지면 벽체를 이루고 있는 역암이 용해되어 방해석을 형성하여, 회반죽 위에 그려진 벽화 페인트가 벗겨지는 것으로 나타났다.[7] 특히 우기 또는 방문객의 잦은 출입으로 인해서 상대습도가 높아지면, 곰팡이 생장과 벽화의 탈락으로 인한 벽화 훼손의 가능성이 높아진다.

7) Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Tomoko Uno, Masaru Abuku, Ken Okada, T. H., Degradation of Mural Paintings in Mogao Cave 285 in Dunhuang. Central European Symposium on Building Physics, 2013, pp. 1-53.

2.3 소결

본 장에서는 고분 보존을 위해 요구되는 환경 조건을 파악하고 공조시스템을 이용한 고분의 보존 가능성을 알아보기 위하여, 문화재의 보존 연구와 고분의 보존 사례를 고찰해 보고 문화재 보존의 개념, 고분과 고분벽화와 관련한 일반적인 내용에 대해 검토하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 문화재는 어디에 존재하든 시간이 흐름에 따라 주위 환경의 화학적·물리적 작용으로 열화현상이 일어난다. 따라서 문화재의 보존이란 오랜 시간 작품의 원형을 지킬 수 있도록 적절한 환경을 제공하고, 처리과정을 하는 것을 의미한다. 보존처리를 통한 수리와 복원 작업도 중요하지만, 올바른 보관과 전시환경을 조성하지 못하면 노화와 파손 등으로 인해 작품의 생명을 단축시킬 위험이 있다. 따라서 문화재의 보존을 위해서는 수동적(passive) 보존활동을 중점으로 하는 접근이 요구된다.

(2) 문화재 중 유물을 손상시키는 환경인자는 온도, 습도, 공기오염, 해충(생물), 충격 및 진동, 자연재해, 건물 및 기계 설계의 오작동, 도난 및 파손이 있다. 이 중에서 환경 하에서 문제가 되는 것은 온도, 습도, 공기오염, 해충이다. 유물의 재질에 따라 보존환경은 달라진다. 일반적으로 고온에서 재질의 열화가 촉진되므로 온도는 동결을 고려하지 않아도 되는 수준에서의 저온으로, 높은 습도는 물리·화학적 반응 및 미생물의 증가 원인이 되므로 습도 조건의 설정이 중요하다.

(3) 전시실 및 수장고에서 보관되는 유물과 달리 발굴된 현장에서 보존되어야 하는 유적 및 유구의 보존 방법은 아직까지 체계화되지 않아 보존에

있어 많은 문제점이 발생하고 있다. 사적의 정비기법으로는 보존처리와 보존환경 개선이 있는데, 유물과 마찬가지로 아무리 보존처리를 하여도 보존환경을 제공하지 못하면 다시 훼손이 진행될 가능성이 있다. 사적의 보존환경 개선은 환경 조건을 갖추는 것 외에도 배수시설, 주변 식생 및 도로, 관람객 통행 등을 포함한다.

(4) 고분은 그 시대를 이해하는데 좋은 자료이나, 보존을 위한 연구는 충분히 이루어지지 않았다. 국내에서는 고분은 보존 대상보다는 관광자원의 차원에서 정비가 이루어졌다. 고분 내부는 외부 환경의 변동에 비해 안정된 환경을 유지하고 있음을 확인하였다. 신관리 석실 고분 연구에서는 실물 실험까지 실시하였음에도 고분의 특성을 고려하지 않고 일반적인 유물의 보존조건으로 공조시스템을 운전하다 고분 내부 환경이 불안정하게 만들었다.

(5) 국외에서는 일본의 다카마쓰즈카 고분과 라스코 동굴이 공조기를 통한 보존을 시도하였으나 현장보존에는 성공하지 못하였고, 석실을 해체하여 보존 시설 내에 보존하거나 복제 동굴을 축조하여 관리하고 있다. 다카마쓰즈카 고분은 석실을 직접 공조하기 보다는 전실을 설치하여 봉분의 온도를 냉각하고자 하였고, 해체 작업 중에도 온도 상승을 방지하기 위해 냉각 파이프를 삽입하고 가건물을 설치해 공조하였다. 고분의 훼손은 높은 습도와 결로로 인한 곰팡이의 발생과 다수의 방문객 출입으로 인한 것이 주원인이었다.

제 3 장 실측을 통한 고분의 열·수분 환경 분석

보존환경의 연구는 대상의 보존을 위해 요구되는 환경 조건을 밝히는 것과 그 환경 조건을 유지시켜주는 것이 필요하다. 따라서 이번 장에서는 고분에 적합한 보존환경을 유지할 방안을 도출할 수 있도록 고분에서 일어나는 열과 수분의 이동 현상에 대해 연구하도록 한다.

본 장에서는 일정 규모 이상이며 벽화가 있는 고분을 선정하여 그동안 적용된 보존 방안을 살펴보고 각 실패한 보존 방안의 문제점을 확인하였다. 특히 공조기 설치에 따른 고분 환경의 변화를 중점적으로 분석하였다. 이어 고분 내부 환경 실측을 통하여 외부 환경의 변화에 따른 고분 내부 환경의 변화와 고분 내부의 미기후 환경을 분석하였다. 이를 통해 최종적으로 고분에서 발생하는 열전달과 물질이동 현상을 정의하였다.

3.1 대상 고분 개요

고분은 봉분의 재료와 모양, 관의 재료, 매장 주체부의 매납 방식에 따라 분류할 수가 있다. 발굴 후 보존되는 고분에 있어서 봉분의 재료와 모양, 매납 방식에 따른 고분의 구조 등이 고려되어야 한다. 고분을 구성하고 있는 재료와 공간의 규모에 따라 다른 보존환경이 정의될 수 있다.

본 연구에서는 벽화가 있으며 전돌을 쌓아 사람이 들어갈 수 있을 정도 규모의 현실을 만든 횡혈식의 석실분인 공주 송산리 고분군 중 6호분을 연구 대상으로 선정하여 보존연혁과 현재의 보존 상태, 내부 온· 습도를 알아보았다.

3.1.1 송산리 6호분

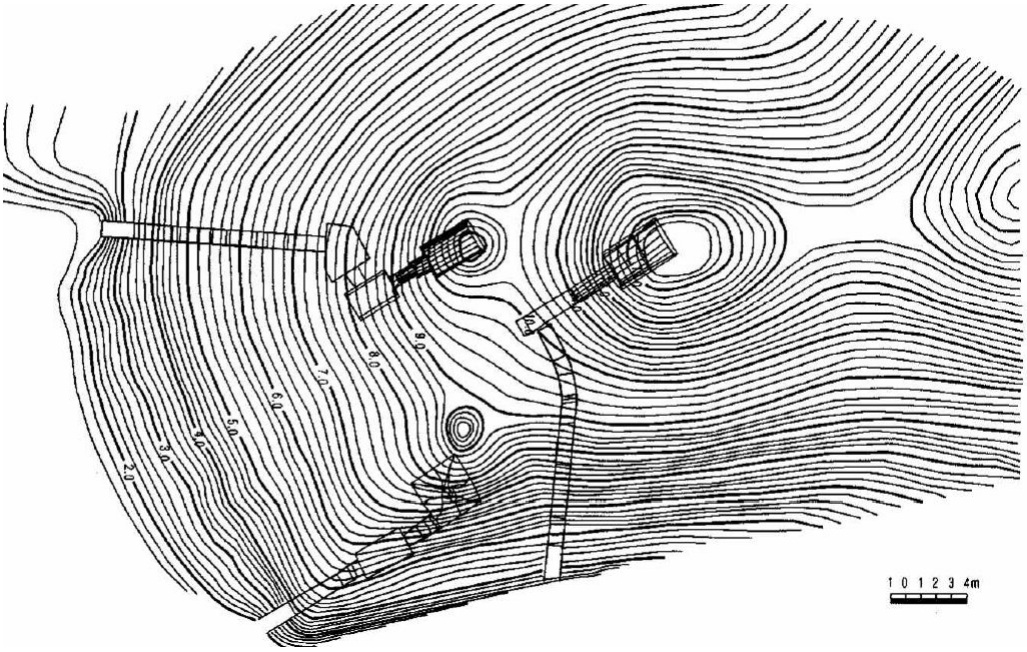
공주 송산리 고분군은 사적 제13호로 지정되어 있는 백제 시대의 대표적인 고분으로, 충남 공주시 금성동 산 5-1번지에 소재한다. 무령왕릉을 포함한 7기의 고분으로 이루어져 있으며, 그 중에서 [그림 3.1]의 한 봉분 아래에 5호분, 6호분, 무령왕릉이 있다. 봉분의 등고선을 포함한 평면도는 [그림 3.2][29]이며 6호분 석실과 연도의 도면은 [그림 3.3][30]과 같다.

이 중 6호분은 삼국시대를 통틀어 유일하게 전축분(塼築墳) 내에 사신도 벽화가 그려져 있는 무덤이다. 현실(玄室)과 연도(羨道)가 아치구조를 이루고 있으나, 오랜 시간이 지나면서 부재의 균열, 탈락 등 물리적인 손상이 천장부에 집중적으로 발생하였다. 현실 내 전돌 위에 회반축 칠을 한 후 사신도를 그린 벽화가 네 방향마다 있으나, 발굴 당시에 비해 벽화의 바탕층 및 채색층이 형상을 알아보기 어려울 정도로 훼손된 상태이다.

---

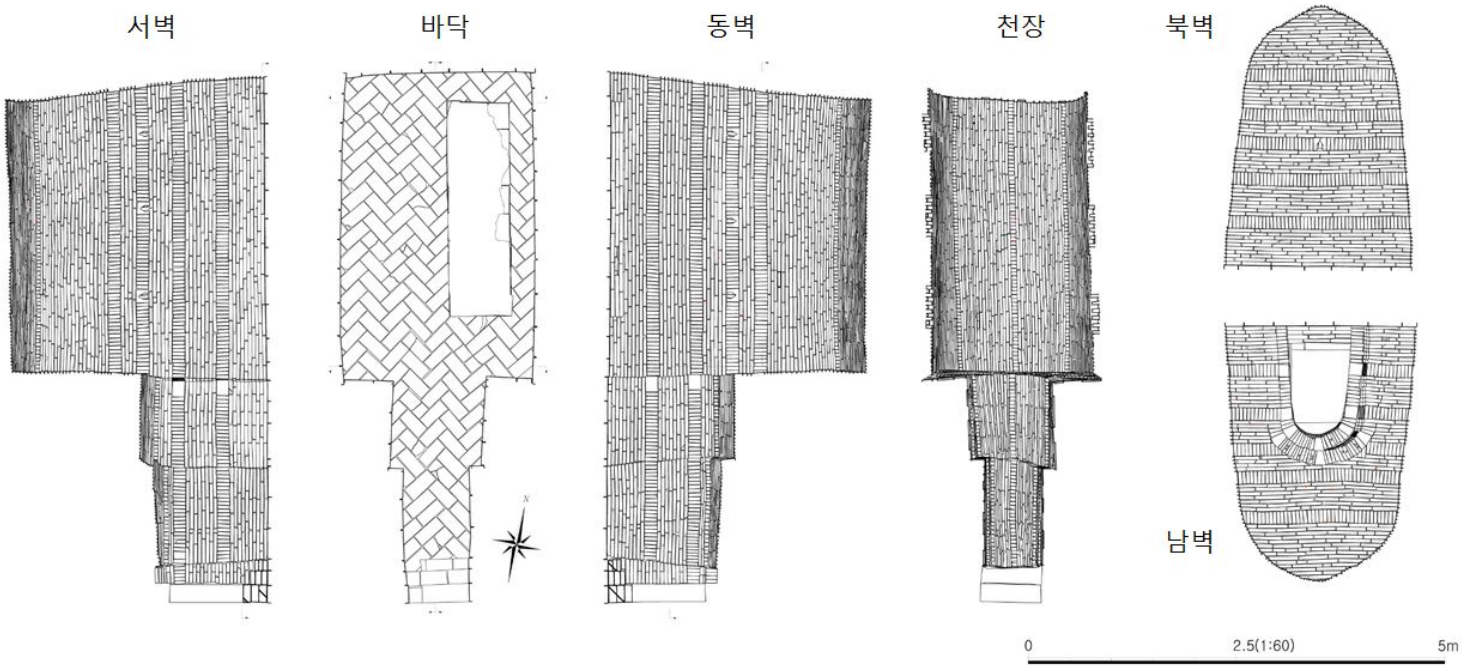
29) 공주대학교 기초과학연구소, 『송산리 고분군의 보존 현황: 송산리 고분군 제2차 종합정밀조사 보고』, 공주시, 부록1, 2000. (공주시, 공주대학교, 공주 송산리 고분군 친환경 공조시스템 개발(연구보고서), 2014, p. 323에서 인용).

30) 혜안미디어, 공주 송산리 고분군 6호분 3차원 기록 및 실측 결과보고, 2009, pp. 1-15.



[그림 3.1] 공주 송산리 고분군 평면도

[그림 3.2] 공주 송산리 고분군



[그림 3.3] 공주 송산리 6호분 도면

3.1.2 보존연혁

고분의 보존 환경을 도출하기 위해서는 보존연혁을 통하여 이전의 보존처리가 이루어졌으며, 어떤 문제가 있었는지를 확인하는 작업이 선행되어야 한다. 본 장에서는 그간의 정비 사업, 시도된 보존 방식과 정밀조사 결과를 통하여 대상 고분에 대해 살펴보았다.

송산리 6호분에 행해진 정비사업 및 정밀조사는 <표 3.1>[8)9)]에 나타내었다. 배수로 정비, 배수, 누수방지시설, 보수공사 등 여러 차례의 정비 사업을 통해 송산리 6호분은 공간 구성, 봉분 형태 등이 발굴 당시에 비해 많은 변화가 있었다. 내부 공간도 기존의 연도와 현실의 구성에서 전실(1971)을 시작으로 두 전실과 입구통로가 신축되었다.

고분 내 과포화된 수분을 제거하고 안정적인 온습도 환경을 유지하기 위해 열풍식제습기(1997), 에어컨 및 제습기(1998), 항온제습기(2004)를 이용한 보존 방식을 시도하였으나, 열풍으로 인한 온도 상승과 벽화 균열, 결로로 인한 기기의 잦은 고장 등으로 매번 가동을 중지하고 철거를 반복하였다.

2004년 설치된 항온제습기는 과포화된 수분을 제거하기 위해 내부 공기순환식 작동방식으로, 제어조건은 온도 18℃, 습도 90%으로 운영되었다.[10)] 2011년 8월 항온제습기의 노후화에 따른 고장이 발생하였고, 이 기간을 이용해 항온제습기를 가동하지 않았을 때와 가동 중일 때의 온도와 습도를 비교한 결과, 항온제습기의 가동을 중지한 기간부터는 습도가 고습이기는 하지만 편차가 거의 없이 지속적으로 모든 공간의 습도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었고, 항온제습기를 가동 중인 기간에 공간별 차이와 편차가 컸고, 이는 항온제습기가 고분 내부의 전체적인 항습을 유지시키지 못하는 것으로 사

8) 공주시, 공주대학교, 공주 송산리 고분군 친환경 공조시스템 개발, 2014, p. 322.
9) 「문화재위원회 회의록」, 제9차 사적분과위원회 회의록, 2012. 9. 12.
10) 공주시, 한국전통문화대학교, 공주 송산리 고분벽화 보존방안 연구, 2012, p. 105.

료된다.[11] 고분 내 항온제습기가 가동되던 시기에는 평균 습도는 낮았지만 고분 내부의 환경변화가 심했으며, 6m/s이상의 높은 토출속도로 인해 벽화의 극건조로 인한 균열 및 박락이라는 부작용을 발생시켰다.[12] 2011년에 항온제습기 운전을 정지한 이후, 연구 목적 외의 출입을 제한하고 측정 장비를 설치해 고분 내부 환경을 지속적으로 모니터링하고 있다.

11) Ibid., pp. 101-103.
12) 공주시, 한국전통문화대학교, 공주 송산리 고분벽화 보존방안 연구, 2012, pp. 105-107.

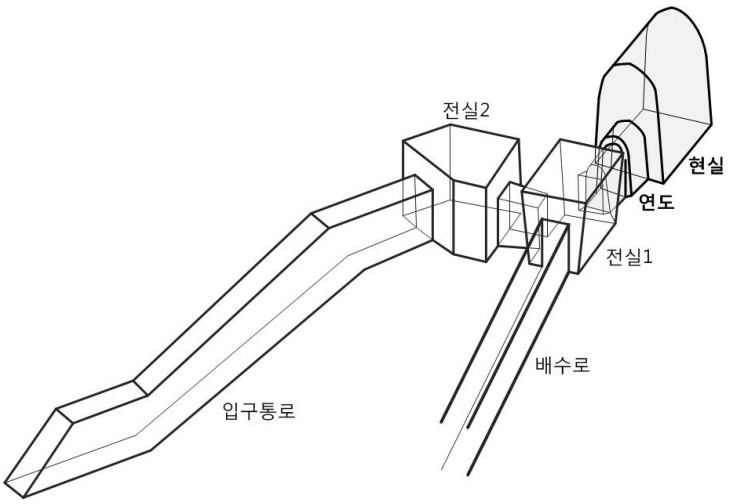
<표 3.1> 대상 고분의 보존조치 연혁

시기	조사 및 정비 사업
1933	6호분 조사 및 정비
1963.1.	배수로 정비 공사, 석축 개축, 조명 설치
1971	6호분 배수공사 중 무령왕릉 발견
1971.1.	전실(3.0평) 신축
1972	보수공사: 고분 조명 시설 및 제습장치
1990-1991	누수방지시설 공사 (봉토 부분에 진흙다짐, 강회다짐 시공)
1995	고분군 내 심각한 누수로 인한 남조류 발생 등 고분의 구조적인 문제 발생
1996-1997	송산리고분군 종합정밀조사 실시(공주대학교) - 누수원인 규명, 벽체 거동 상황 및 구조안전 점검 - 조류의 제거 및 공기조화 시설 연구
1997.5.	제습기 및 에어컨 설치 (기설치된 제습기 및 조명시설 등 불량시설 철거)
1997.7.	송산리 고분군 폐쇄 결정 - 모형고분 조성 결정 - 내부 관람 중지
1998	에어컨 및 제습기 설치(문제점: 고분 내부 결로 현상 발생)
1999	보수공사 실시 - 누수방지용 강회다짐 공사 - 무령왕릉의 관람을 위한 전실공간의 되메움 공사 - 봉분재조정
2000	송산리 고분군 2차 정밀조사 실시(공주대학교) - 보수공사 전・후・내・외부현황 대비분석 - 누수여부, 구조거동 및 안전상태 계측 - 고분군 주변 환경 상시 모니터링 - 남조류 제거 후 생태계 변화 조사
2003.9.	항온제습기 설치(조건: 온도 18℃, 습도 90%)
2004	공기조화 설비 개선 - 항온제습기, 배전 및 배관, 실외기 설치 - 문제점: 설비의 내부 설치에 의한 설비조작 불편 및 설비 등에 의한 고분 내부 미관 저해
2010	백제 송산리 6호 벽화고분 보존 연구 실시(한국전통문화대학교)
2011	송산리고분군 보존방안 연구 실시(한국전통문화대학교) - 고분군 환경 모니터링 시스템 구축 및 구조 안전진단 - 6호 벽화 토벽체 안정화 및 응급 보존처리, 벽화 제작기술 연구
2011.9.	항온항습장치 가동 중단

3.1.3 기설 공간 현황

대상 고분의 형식은 횡혈식(橫穴式)으로 현실과 연도로 구성된 전축분이다. 현실과 연도 모두 아치형 천장으로 되어 있고 현실의 규모는 장축 4.1m, 단축 2.2m, 높이 2.9m이다. 발굴 이후 관람 및 공조 등의 목적으로 전실, 입구통로가 신설되었고, 약 25m 길이의 배수로가 시설되어 있으며, 현재의 공간 구성은 [그림 3.4]와 같다.

지구물리학적 조사를 통해 대상 고분은 축조부지 능선의 일부구간을 절개하여 고분을 건설한 후 강회다짐을 하고 파낸 흙을 다시 덮는 방식으로 축조되었을 것으로 추정[13]된다.



[그림 3.4] 대상 고분의 공간 구성

13) 서만철, 이창환, 정계옥, 김동현, 송산리 고분군의 지구물리학적 조사를 통한 고분축조방법 고찰, 보존과학회지, 1997, 6(1), pp. 61-70.

3.2 고분 내부 환경 실측

본 장에서는 고분 내부의 온도와 상대습도를 측정하여 이를 외부의 기상변화와 비교분석하였다. 온도와 상대습도의 급격한 변화는 재질의 열화를 촉진시킬 수 있으므로, 고분 내부 미기후 환경의 특성을 살펴보았다.

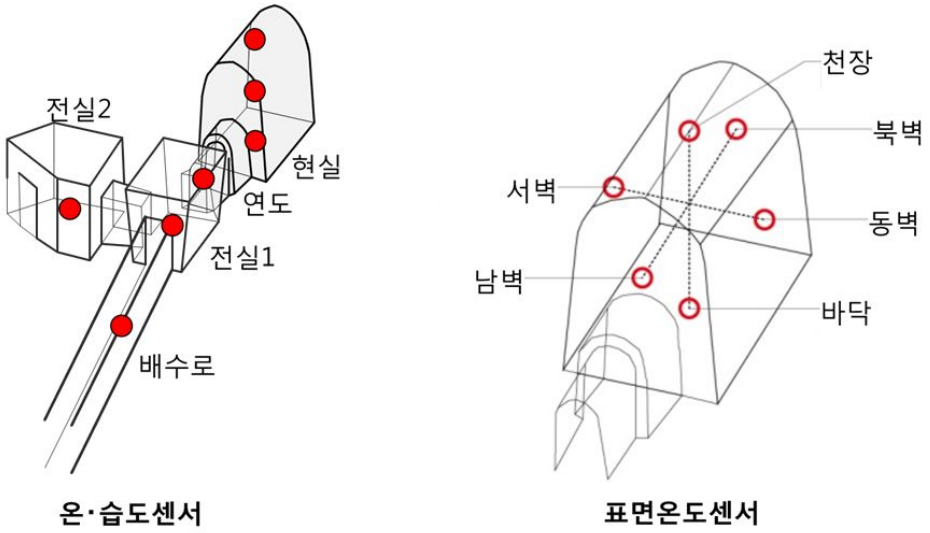
고분 내부로의 잦은 출입은 고분에 악영향을 미칠 수 있으므로, 공주 송산리 고분벽화 보존방안 연구(공주시, 한국전통문화대학교, 2012)에서 설치한 측정 장비를 통해 측정된 고분 내·외부의 환경 데이터를 이용하였다.

(1) 고분 내·외부 환경 데이터의 수집

온도와 습도는 고분 내부는 각 공간마다 중앙의 한 지점에서 측정하였고, 현실 내부는 수직적으로 높이마다 3개 지점에 센서를 설치하여 높이별 차이를 실측하였다. 고분 외부의 환경은 문화재인 고분의 원형을 훼손하지 않도록 송산리 고분군 내 모형관 위에 측정기기를 설치하여 온도, 습도, 강우량, 토양수분을 측정하였다. 측정에 사용된 장비와 설치 위치는 <표 3.2>, [그림 3.5]와 같다. 이외에 모형관 위에서 측정하지 못한 일사량과 지중 온도에 관한 데이터는 공주시와 근접한 대전시의 기상청 자료를 이용하였다.

<표 3.2> 고분 환경 측정 장비 및 설치 위치

측정 대상	모델명	설치 위치
온·습도	HMP155	고분 내 7지점, 고분 외부
표면온도	Campbell Sci. 107	현실 내 6지점
풍향·풍속	C5103	고분 외부
강우량	RG50	고분 외부
토양수분	CS616	고분 외부



[그림 3.5] 고분 내 환경 측정 장비 설치 위치

(2) 고분 내·외부 환경 데이터의 가공

설치되어 있는 기기에서 2011년 7월부터 1시간 단위로 측정된 데이터 중에는 데이터의 누락 및 오류 발생 빈도가 높았다. 이는 항온제습기의 철거 과정에서 측정 기기의 운전 정지, 답사 과정에서 사람이나 전파의 영향으로 인한 것이거나 설치되어 있는 기기의 문제로 추측되지만, 답사일지나 측정 장비의 운전 기록이 이루어지지 않아 정확한 이유를 판단하는 것이 불가능하다.

측정된 데이터를 기준으로 계절별 변화를 확인 할 수 있으면서도 데이터의 누락이 적어 분석이 용이한 시기를 선택하여 고분 내 환경변화를 분석하였다. 2012년 동안 6호분의 데이터는 8월 15일에서 8월 19일까지 만 4일 미만의 기간 동안만 데이터의 누락이 있었으므로 이 기간 동안의 데이터를 이용하였다.

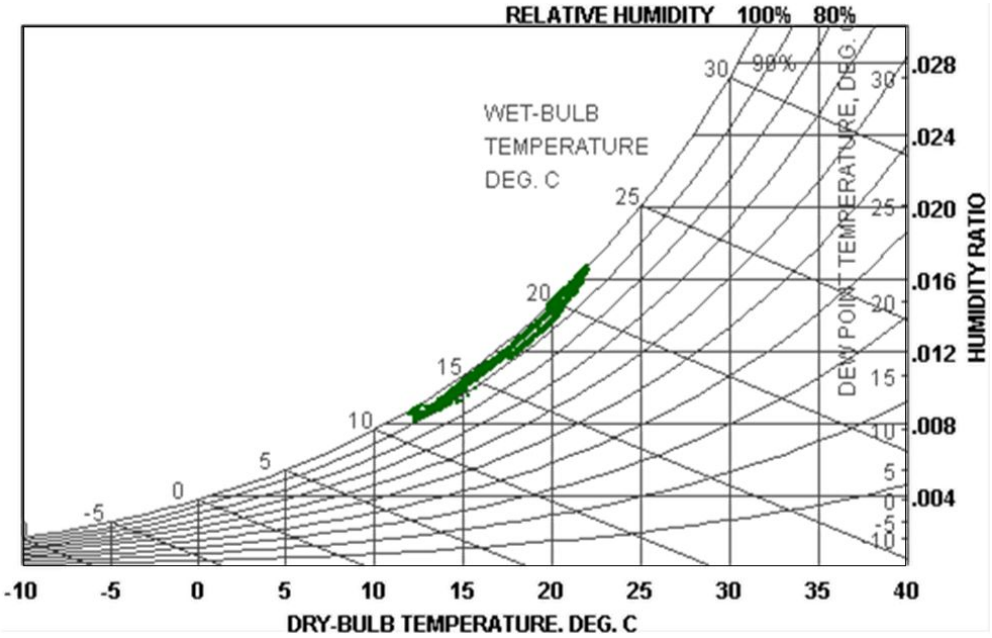
3.3 고분 내부 환경 실측 결과 분석

본 장에서는 고분 내부와 주변 환경의 실측을 통하여 고분의 미기후 특성을 분석하고자 하였다. 미기후(microclimate)는 지표면부터 지상 1.5m 정도 높이까지의 영역에서 반복되어 출현하는 평균적이고 종합적인 기후로, 온도, 습도, 바람, 열균형, 증발작용과 같은 조건에 의해 변화하는 미기후의 특성을 통해 문화재의 손상 요인을 해석하고 보존환경을 평가할 수 있다.[14] 고분에서 발생하는 열과 수분의 전달 현상을 파악하기 위해 온도와 습도의 변화를 중심으로 고분의 열과 수분 환경을 분석하였다.

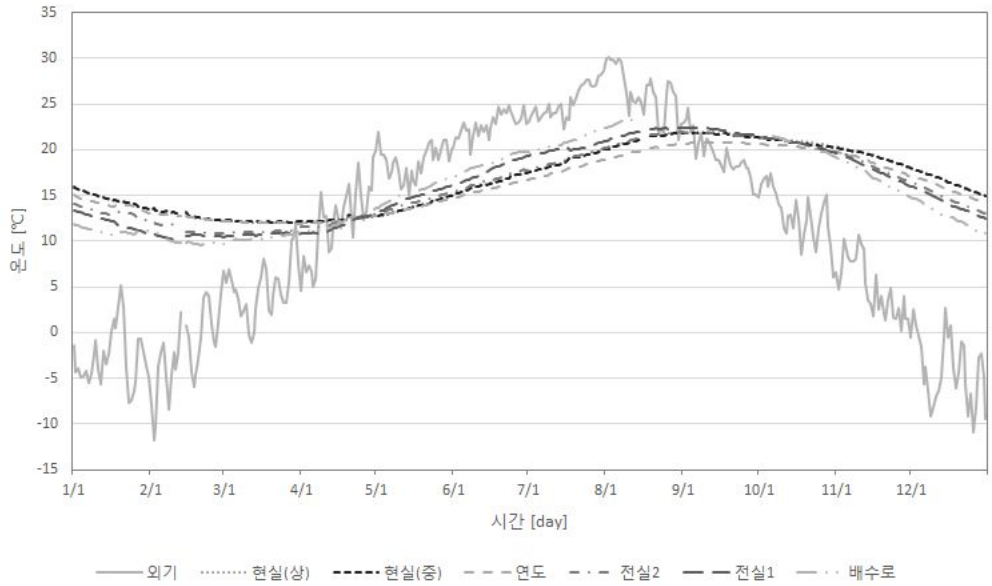
(1) 온도 변화

고분 내부의 연간 변화는 온도 11.9-22.2℃, 습도 95-100%로 모두 변화가 크지 않으며 습공기선도 상으로는 [그림 3.6]와 같게 나타난다. [그림 3.7]에서 볼 수 있듯 여느 지하공간과 마찬가지로 외기에 비해 연평균 온도가 높고 편차가 작고(decrement factor), 시간 지연(time lag)이 나타난다. 외기는 연간 -18℃에서 54℃까지 변화하지만, 고분 내부 연교차는 약 10℃에 불과하다. 이러한 현상은 봉분의 축열에 기인한 것으로, 봉분이 가장 두터운 연도의 연교차가 가장 작다. 약 2개월의 시간 지연이 있으며, 고분 내부의 공간별로 약간의 차이가 있다. 고분 내 공간 중에서는 외기와 가까운 입구통로, 배수로의 온도 변동이 크고, 전실을 지나 연도와 현실로 갈수록 연교차가 작아진다.

14) 김지영, 이찬희, 현풍석빙고의 미기후 분석을 통한 손상요인 해석과 보존환경 평가, 보존과학회지, 2010, 26(4), pp. 389-400.

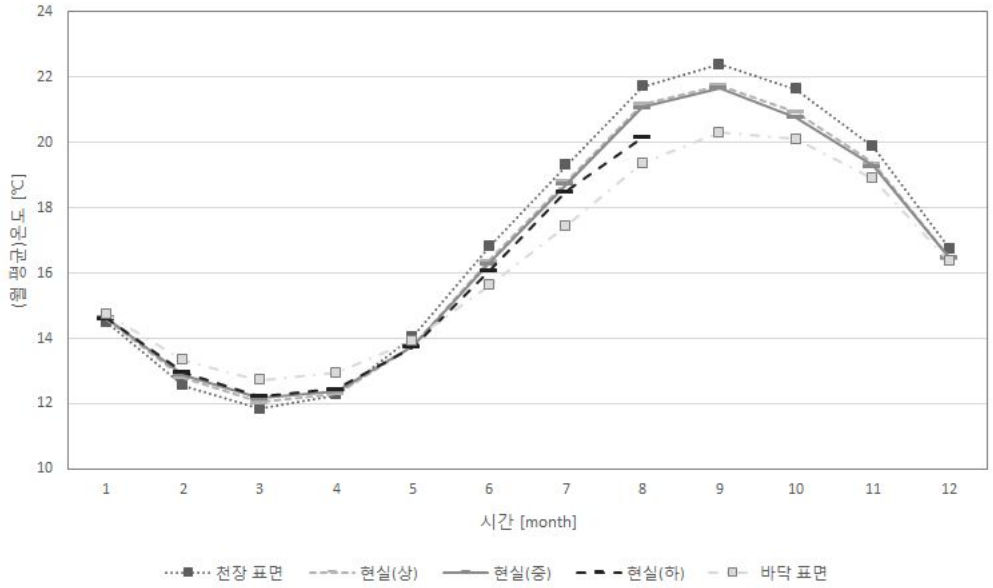


[그림 3.6] 연중 6호분 현실 내 온·습도 분포



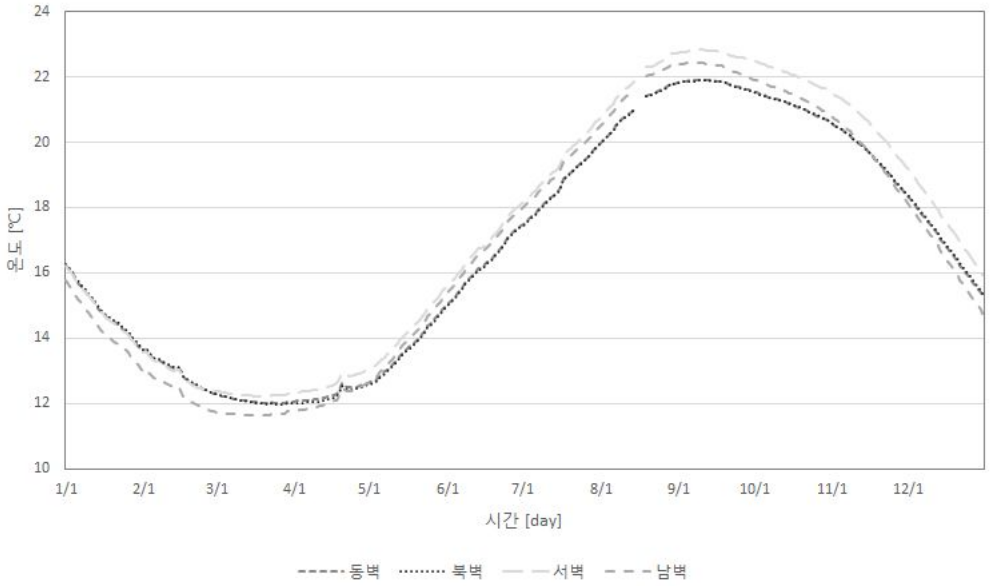
[그림 3.7] 연중 외기와 고분 내 공간별 일평균 온도 변화

일반적으로 지표면에서 지중으로 깊이가 깊어질수록 토양의 열용량과 낮은 전도도의 영향으로 연교차가 감소하는데, 현실 내 높이에 따른 온도 변화 또한 지열의 영향을 가장 많이 받는 바닥의 온도 연교차가 작고, 천장의 연교차가 가장 큰 것을 [그림 3.8]에서도 확인할 수 있다. 천장과 바닥의 온도 차이로 인해 현실 내 온도는 상부가 하부보다 연교차가 크다. 바닥의 온도가 천장보다 높은 시기에는 공기의 대류로 인해 다른 기간에 비해 높이별 온도 차가 감소한다. 반면 천장의 온도가 바닥보다 높은 시기에는 성층이 강화될 것으로 예상된다.



[그림 3.8] 연중 고분의 현실 내 높이별 월 평균 온도 변화

현실 내 표면온도는 [그림 3.9]와 같이 규칙이 발견되지는 않지만 벽체별로 차이가 존재한다. 서벽은 연중 온도가 높은 편으로 결로 발생 시기가 짧으며, 북벽은 가을, 겨울철에 다른 벽체에 비해 온도가 낮다. [그림 3.7]의 천장과 바닥의 표면온도 변화를 포함하여, 이러한 벽체별 온도의 상대적 차이는 결로 발생의 위치에 영향이 있을 것으로 판단된다. 실제로 천장·바닥과 남벽·북벽의 계절별로 결로 발생 위치를 관찰한 결과 1월부터 4월까지는 천장에 결로가 발생하다, 6월 이후부터는 바닥에 결로가 발생하였고, 남벽의 결로가 사라지며 북벽에만 결로가 남아있었다.[15]



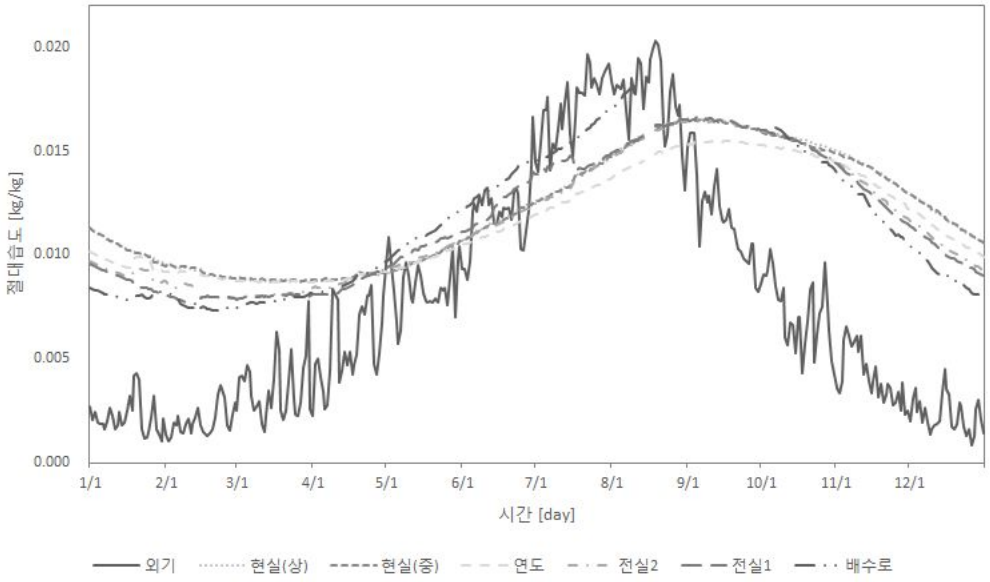
[그림 3.9] 연중 석실 내 벽체별 일평균 표면온도 변화

15) 공주시, 한국전통문화대학교, 공주 송산리 고분벽화 보존방안 연구(연구보고서), 2012, pp. 162-176.

(2) 습도

고분 내부의 상대습도는 평균 99.8%로 1년 내내 100%에 가까운 다습한 상태를 유지한다. [그림 3.10]을 통하여 고분 내부와 외부의 절대습도를 비교할 때, 평균 절대습도 또한 12.1g/kg으로, 7.9g/kg인 외부보다 높다. 이러한 현상은 외기 외에 고분 내부에 봉분의 토양수분이 일종의 수분공급원이 되고 있는 것으로 판단된다.

공간별 연간 절대습도를 비교하면 외기와 직접적으로 연결되어 있는 공간인 배수로의 절대습도가 연간 변화량이 많고, 출입구로부터 가장 멀리 떨어져 있는 현실 내부의 절대습도의 변화폭이 가장 작다. 이것으로 보아 외부의 습기 이동이 출입구 쪽의 문의 틈새라든지, 배수로의 외기와 연결된 파이프로부터 확산되어 들어온다는 것을 알 수 있다.

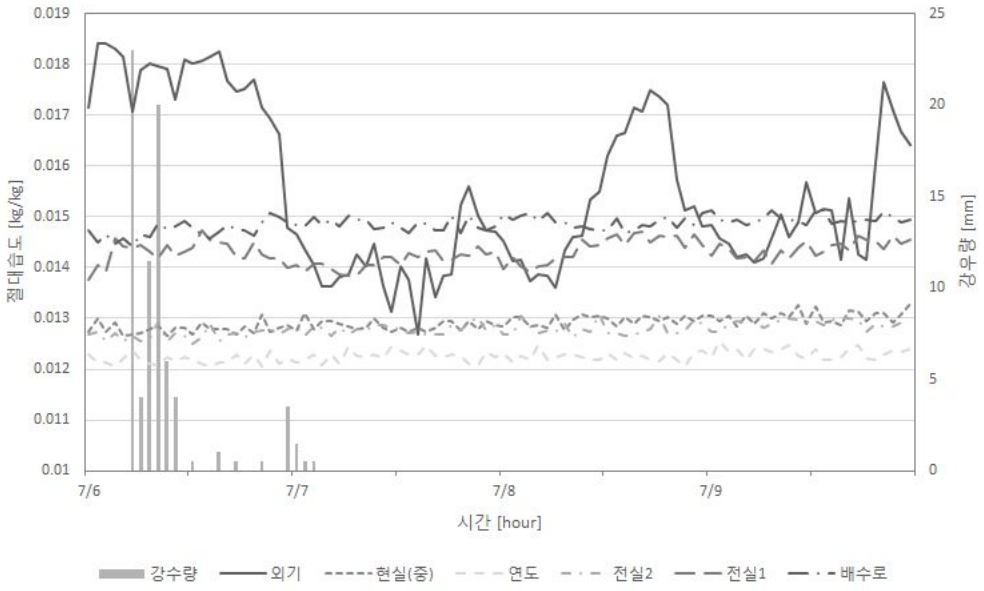


[그림 3.10] 연중 외기와 고분 내 공간별 일평균 절대습도 변화

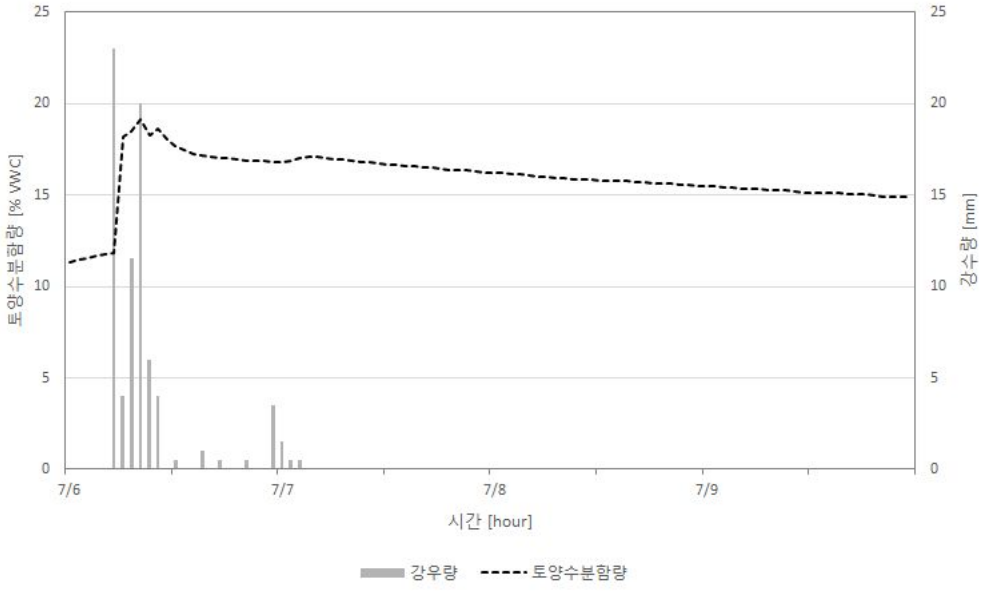
연중 높은 습도의 원인 또는 고분 내부의 물방울의 근원이 빗물의 누수에 의한 것인지 확인하기 위해 강우량과 고분 내 절대습도의 관계를 비교한 그래프는 [그림 3.11]과 [그림 3.12]으로, 강우량과 고분 내부 공간별 절대습도, 봉분의 토양수분함량의 변화이다. 외기와 달리 고분 내부의 수증기분압은 강우의 영향이 미미함을 확인할 수 있다. 그래프 상에 표현하지 않았지만 상대습도 또한 고분 내부는 강우와 상관없이 100%에 가까운 상태를 유지한다.

외기의 수증기분압과 마찬가지로 봉분의 토양수분함량 또한 강우에 따라 증가하지만 금세 평소의 상태로 회복된다. 이는 토양수분(soil moisture)는 토양 입자 사이의 모세관력에 의해 유지되는 모세관수(capillary water)가 존재하며, 강우 등에 의해 과잉으로 존재하는 수분은 중력의 영향으로 빠르게 배수가 이루어지기 때문에 나타나는 현상이다.[16] 봉분을 통한 직접적인 누수는 없는 것으로 판단된다.

16) William A. Jury, Robert Horton, 『Soil Physics』 6th ed, JOHN WILEY&SONS, INC., 2004.



[그림 3.11] 강수 후 외기와 고분 내부의 수증기분압 변화 (2012년 7월 6-9일)



[그림 3.12] 강수 후 토양수분함량 변화 (2012년 7월 6-9일)

3.4 실측 자료를 이용한 고분의 열·수분 이동 메커니즘 도출

고분의 석실 내부 환경은 대개 바깥 공기와 격리되어 있으며, 석실의 깊이와 토양의 열전도율 및 열용량에 의해 외기온의 변동에 비해 내부 변화의 폭은 좁고 안정된 보존환경을 유지하는 것으로 알려져 있다.[17] 일반적인 건축물과 달리 고분은 흙으로 된 두터운 봉토로 덮여 있어 봉분에 포함된 열과 수분에 따라 열과 수분의 이동에 영향을 줄 것이다. 이러한 고분의 환경을 분석하기 위해서는 열과 수분의 두 가지 전달을 모두 고려한 분석이 요구된다.

3.4.1 열·수분 이동 이론 고찰

3장의 고분의 환경조사 결과를 바탕으로 고분에서 일어나는 열과 수분의 이동 메커니즘을 추론하였다. 일반적인 열과 수분 이동의 종류는 <표 3.3>[18]과 같으며, 고분에서는 외피인 봉분과 틈새를 통해 이동할 것이다.

17) 전용두 외, 고분내부에 설치된 공조시스템의 운전특성, 에너지공학, 2006, 15(3), pp. 202-208.
18) H.M. Künzel, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-dimensional Calculation using Simple Parameters, IRB-Verlag Stuttgart, 1995, p. 5.

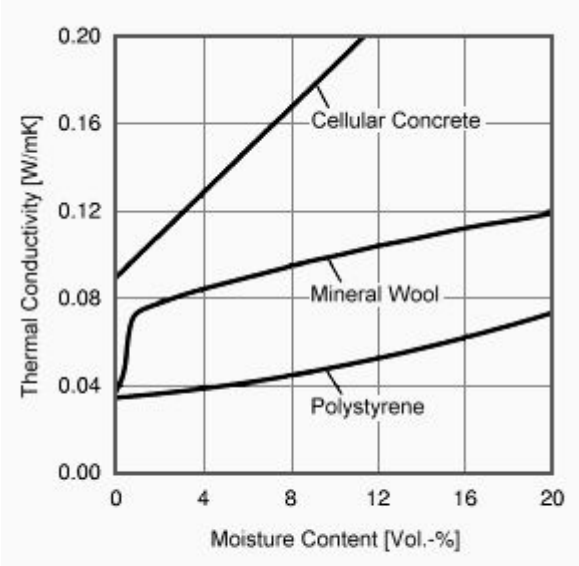
<표 3.3> 열과 수분 이동 메커니즘의 종류

	Transport mechanism	Cause and Potential of Transport
Heat	Heat conduction	Temperature
	Heat radiation	Temperature in 4th power
	Air flow	Total pressure, density differentials
	Enthalpy flows through moisture movement	Vapour diffusion with phase change & liquid transport flow in temperature field
Vapor	Vapor diffusion	Vapour pressure (temperature, total pressure)
	Molecular transport (effusion)	Vapour pressure
	Solution diffusion	Vapour pressure
	Convection	Total pressure gradient
Liquid	Capillary conduction	Capillary suction stress
	Surface diffusion	Relative humidity
	Seepage flow	Gravitation
	Hydraulic flow	Total pressure differentials
	Electrokinetics	Electrical fields
	Osmosis	Ion concentration

고분의 석실내부 환경은 대개 바깥 공기와 격리되어 있으며, 석실의 깊이와 토양의 열전도율 및 열용량에 의해 외기온의 변동에 비해 내부 변화의 폭은 좁고 안정된 보존환경을 유지하는 것으로 알려져 있다.[19] 그 외에도 고분 내부는 연중 고습한 환경을 유지하는 것을 [그림 3.6]에서 확인하였다. [그림 3.13][20] 과 같이 일반적으로 공극이 있는 물체는 함수량이 증가할수록 물체의 열전도율이 커지고, 온도에 따라 물체가 포함할 수 있는 수분의 양이 달라지므로 열과 수분이 상호 영향을 미친다. 일반적으로 온도가 높아짐에 따라 물체에서 포함할 수 있는 수분량은 증가한다. 일반적인 건축물과 달리 고분은

19) 전용두 외, 신관리 석실고분 내부의 계절별 온습도 변화 특성, 대한설비공학회 2004동계학술발표대회 논문집, 2004, pp. 253-258.
20) http://www.ibp.fraunhofer.de/

흙으로 된 두터운 봉토로 덮여 있어 봉분에 포함된 열과 수분에 따라 열과 수분의 이동에 영향을 줄 것이다. 이러한 고분의 환경을 분석하기 위해서는 열과 수분의 두 가지 전달을 모두 고려한 분석이 요구된다.



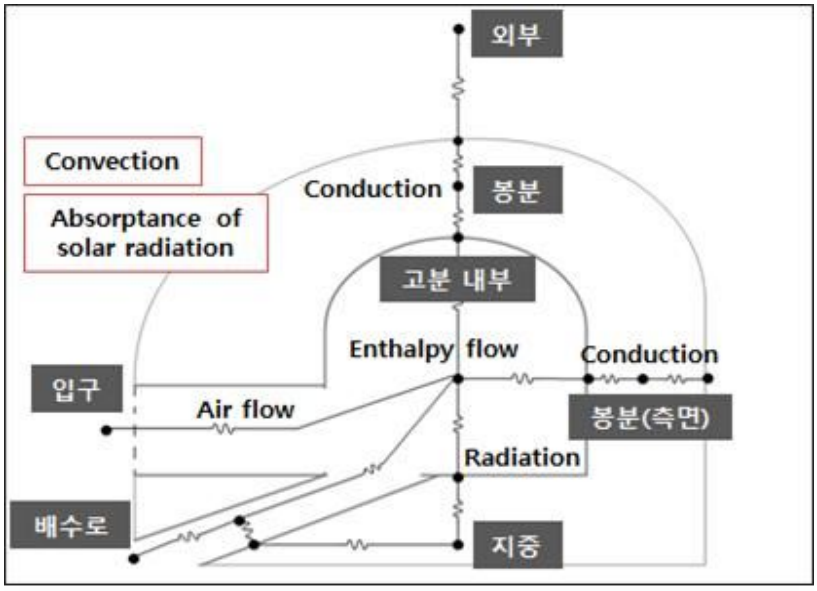
[그림 3.13] 건축물 자재에서 측정된 함수량에 따른 열전도율 변화

3.4.2 고분의 열·수분 이동 메커니즘

고분의 환경조사 결과를 바탕으로 고분에서 일어나는 열과 수분의 이동 메커니즘을 추론하였다. 고분에서는 봉분을 통한 열과 수분의 이동과 축열 및 저장이 이루어지며 그 외에도 개구부를 통해 침기의 형태로 열과 수분이 전달될 수도 있다.

(1) 고분의 열 이동 메커니즘

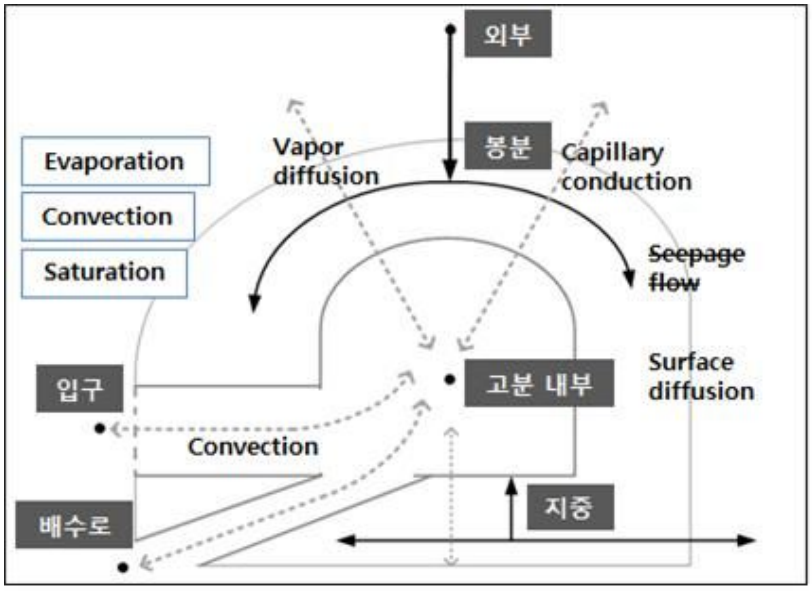
고분에서 일어나는 열의 이동은 [그림 3.13]에서처럼 봉분을 통한 외기와 지중의 열전도, 벽체 표면에서의 복사, 개구부를 통한 공기의 이동(기류)와 수분의 상변화에 의한 엔탈피 흐름이 발생한다. 그 외에도 <표 3.1>의 보존연혁을 참고할 때 과거에는 기기설치, 사람 출입에 따른 내부 발열이 존재하였다.



[그림 3.14] 고분에서 발생하는 열전달 현상

(2) 고분의 수분 이동 메커니즘

봉분에서는 수증기 분압 차에 의한 확산으로 수증기가 이동하며, 강회다짐층과 같은 밀실한 재료에서는 미세기공확산을 통해 수증기의 이동이 있을 것이다. 봉분에 함수량이 높을 경우 모세관 전도가 있을 것이며, 표면에 얇은 흡착층에 의한 물 분자의 이동(표면확산)이 존재할 것이다. 누수방지층을 시공하여 강수로 인한 누수 발생은 없을 것으로 가정한다. 또한 6호분은 축조부지의 능선을 절개하여 고분을 축조한 후 강회 다짐을 하고 파낸 흙을 다시 덮는 방식으로 축조[21]되었으므로 고분 지면에 지하수의 유입은 없는 것으로 추정할 수 있다. 용해확산, 유압흐름, 전기역학, 삼투는 특수한 경우에 발생하는 현상으로 고분에서는 발생하지 않는다. 고분에서 발생하는 수분의 이동 및 경계조건은 [그림 3.14]과 같다.



[그림 3.15] 고분에서 발생하는 수분이동 현상

21) 서만철, 이창환, 정계옥, 김동현, *op.cit.*

3.5 소결

본 장에서는 일정 규모의 벽화가 존재하는 고분을 선정하여 보존연혁을 공조기 설치에 따른 고분 환경의 변화를 중심으로 분석하였다. 이어 고분 내부 환경 실측을 통하여 외부 환경의 변화에 따른 고분 내부 환경의 변화와 고분 내부의 미기후 환경을 분석하였다. 일반적인 열과 수분의 이동 현상에 대한 이론을 바탕으로 고분에서 발생하는 외부와 고분 내부 사이의 열과 수분의 이동 메커니즘을 추측하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 횡혈식의 고분으로 사람이 들어갈 수 있을 정도의 규모이며, 벽화가 존재하는 전축분인 공주 송산리 고분군 중 6호분을 대상으로 선정하였다. 고분 내부의 환경 실측에 앞서, 보존연혁과 기설 공간 현황 등 기초조사를 실시하였다. 원형을 보존해야하는 원칙에도 불구하고 고분은 발굴 이후 정비사업을 통해 내부 공간이 신축되고 봉분 재조정이 이루어졌다. 공조기를 통한 온습도 환경을 유지하기 위한 시도가 있었으나 고분 내부 환경을 고려하지 않아 오히려 운전 및 철거 과정에서 고분을 훼손시켰다. 현재 항온제습기 운전을 정지한 채로 출입을 제한하고 내부 환경을 지속적으로 측정하고 있다.

(2) 대상 고분은 기존의 현실과 연도 외에도 관람 및 공조 등의 목적으로 전실과 입구통로, 배수로가 신설되었다. 환경 실측 대상은 현실과 연도 외의 전체 공간을 포함하였고, 모형관 위에서 고분 외부 환경을 측정하였다. 고분 내부로의 잦은 출입은 고분에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있으므로, 기존의 연구에서 설치된 측정 장비로 수집된 데이터를 이용하였다. 고분 내부의 온도와 습도, 고분 외부의 온도, 습도, 강우량, 토양수분 데

이터를 분석하였다.

(3) 실측 결과, 고분 내부 온도는 외기에 비해 편차가 작고, 약 2개월의 시간 지연이 있었다. 공간별로 미세한 차이가 있었고, 외기와 가까운 입구 통로와 배수로의 온도 변동이 상대적으로 크게 나타난다. 현실 내에서는 바닥은 지열의 영향으로 천장에 비해 연교차가 작으며, 이로 인해 천장과 바닥의 온도가 역전하는 시기가 발생한다. 습도 또한 외기에 비해 높고 변동이 적었다. 고분 내부의 높은 습도는 빗물의 누수보다는 봉분에 유지되는 토양수분의 영향으로 판단된다.

(4) 열과 수분이 저장과 전달에 있어 상호작용을 하므로, 봉분으로 덮여 있는 고분 내 환경을 이해하기 위해 발생할 수 있는 열과 수분의 이동 메커니즘을 실측 결과를 바탕으로 추정하였다. 봉분을 통한 열의 전도, 수증기의 확산, 액체의 모세관 전도와 밀실하지 못한 틈새를 통한 기류로 열과 수증기가 이동할 것이다. 고분 축조 방식과 누수방지층을 시공한 것을 참고할 때, 강우의 누수와 지하수 상승으로 인한 유입은 발생하지 않을 것으로 추측하였다.

제 4 장 고분의 석실 및 벽화 보존 방안

4.1 개요

앞서 살펴본 대상 고분의 실패한 보존 방안의 문제점과 고분의 미기후 환경 분석 내용을 바탕으로, 본 장에서는 고분의 구성요소 중 보존 대상을 선정하고 훼손요인에 따른 해결방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 고분의 구성요소 중 석실과 벽화를 보존 대상으로 선정하여 각 요소의 훼손 요인을 분류하였다. 석실과 벽화의 보존을 위해서는 전돌의 물리적 안정성과 미생물의 생장 억제가 요구될 것이며, 이를 위한 보존환경 기준은 기존의 연구 결과를 참고하여 정리하였다. 실측을 바탕으로 추론한 고분의 열과 수분의 이동 현상을 바탕으로 보존환경 기준을 만족시킬 수 있게 하는 보존 방안을 제시하였다.

그 외에도 문화재에 해당하는 고분의 특성상 요구되는 원형보존, 가역적인 조치 등의 조건을 반영하여 현실적으로 실현 가능한 보존 방안을 제시하고자 하였다.

4.2 고분의 보존환경 기준 설정

4.2.1 고분 내 보존 대상과 훼손 요인

고분의 보존 방안을 정하기 위하여 보존 대상과 각 대상의 훼손 요인을 분석하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 고분은 전돌을 쌓아 축조하였으며, 벽화가 존재하는 벽화 전축분으로 벽화의 보존을 목표로 한다.

벽화고분의 보존에 있어 주요한 보존 대상은 벽화로, 기존의 연구는 벽화의 보존을 위해 벽화의 상태, 제작 방법, 사용된 접착제나 유기안료, 미생물 분포 등을 알아내어 보존처리 작업을 선택 및 시행한 후 보존처리 작업 후 부작용이 없는지 관찰하였다. 일반적으로 고분은 봉분의 모양, 관의 재료, 매납 방식에 따라 분류하며, 이에 따라 봉분, 관, 석실 등의 요소가 보존 대상에 포함될 수 있다. 벽화고분은 다양하고 풍부한 묘실 구조와 다채로운 벽화 내용을 통해 축조 당시를 연구하는데 있어 자료를 제공하므로[32], 묘실 자체도 보존 대상이 되어야 한다. 그 외에도 문화재로 등재될 경우 문화재보호법(법률 제10829호) 제3조에 따라 원형유지를 기본원칙으로 함으로 봉분 또한 보호대상에 포함될 수 있다.

32) 김기웅, 『고분』, 서울: 대원사, 1991, p. 87.

<표 4.1> 고분 내 벽화의 훼손 요인

항목	훼손 요인	
오염	미생물의 생장	미생물(곰팡이, 세균)이 분비하는 세포외효소 작용으로 인해 벽화의 색채 손상[33]
	결로	누수 및 차수를 위해 구축한 강회다짐층의 칼슘과 빗물의 백화현상으로 오염물 발생[34]
탈락	벽체의 물리적 안정성	결로 등 수분으로 인한 석실 및 벽체에 가해지는 하중 증가로 전돌 균열
		온도 또는 습도의 변동에 따른 팽창, 수축의 반복으로 전돌 균열 및 바탕층 박락

벽화는 미생물의 생장에 의해 오염, 바탕층의 균열에 의해 탈락할 수 있다. 고분벽화를 제작할 때 사용되는 접착제, 유기안료 등은 미생물의 영양원이 될 수 있다.[35] 석실의 구조적 문제는 벽체의 균열을 야기하여 벽화의 훼손까지 이어질 수 있다. 석실의 훼손은 고분 벽체를 이루는 전돌의 균열 및 박락에서 유발될 수 있는데, 강수와 온도 변화에 의해 벽체 거동이 많아진다.[36] 벽화를 보존하기 위하여 미생물의 생장 제어와 벽체의 물리적 안정성 유지가 필요하다.

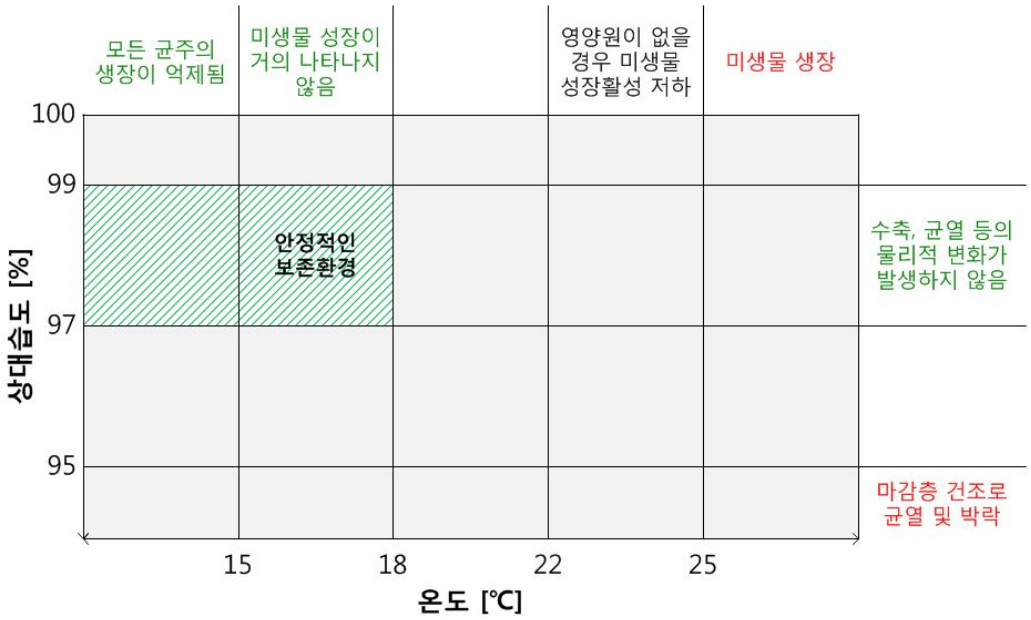
33) 이민영, 김대운, 정용재, *op. cit.*
34) 공주시, 공주대학교, 공주 송산리 고분군 친환경 공조시스템 개발(연구보고서), 2014, p. 99.
35) 황채금, "근대유화의 수복기술 연구: 배접방법을 중심으로", 한서대 대학원 석사학위 논문, 2001. (이민영, 김대운, 정용재, 공주 송산리 고분 내 미생물 분포 및 보존환경 연구, 보존과학회지, 2014, v30 n2, p. 170에서 인용).
36) 서만철, 박은주, 경사도변화 계측을 통한 백제 송산리 고분군의 지하 벽체거동특성과 안정성, 98 대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회, 1998, pp. 53-72.

4.2.2 고분의 보존환경 기준

문화재는 재질에 따라 적합한 보존환경을 유지해주어야 노화와 파손을 지연시켜 오랜 기간 원형을 보존할 수 있다. 문화재 중 전시시설 및 수장시설에서 전시 및 보관되는 유물은 품목에 따라 보존 기준 온·습도에 대한 연구 결과가 존재하며, 폐쇄된 공간 내에서 요구되는 보존환경을 유지하고 있다. 그러나 고분은 보존을 위해 적합한 환경 조건이 아직까지 규정되어 있지 않다. 본 장에서는 의사시료를 제작 후 균주 현탁액을 접종하여 주변 온도와 습도 조건에 따른 변화를 관찰한 연구 결과를 참고하여 고분 보존을 위해 요구되는 미생물 제어와 벽화의 물리적 안정성 확보을 위한 요구 조건을 분석하였다.

<표 2.4>의 국외 고분의 보존사례를 참고하면 고분 보존환경은 각 고분의 자재, 주변 기온 등에 따라 달라져야 함을 알 수 있다. 문화재 훼손의 주요 원인은 상대습도 변화와 미생물의 생장으로, 온도와 습도의 변화가 없는 안정적인 환경을 조성해주어야 한다. 미생물은 온도와 습도, 영양분 등의 조건이 만족될 때 생장하므로 각 조건 중 하나를 제어해야 한다. 습도를 낮출 경우 벽화 탈락 및 전돌의 균열을 발생시킬 수 있으므로 기존의 고습한 환경을 유지하는 대신, 온도를 낮게 유지하는 것이 적합하다. 인공적인 기류는 최소화하여 벽화 및 전돌의 풍화와 수분증발이 일어나지 않도록 해야 한다.

공주 송산리 고분군 친환경 공조시스템 개발(공주시, 공주대학교, 2014)에서는 벽화 마감층의 재료적 특성이 유사한 조건의 의사시료를 제작하고 균주 현탁액을 접종한 뒤 항온항습 챔버와 고분 내에 배치하여 온·습도 조건에 따른 물리적 특징과 변화를 관찰하였다. 실험을 통해 환경조건에 따라 발생되는 의사시료의 물리적 변화를 파악하여 제시한 미생물 제어와 벽화의 물리적 안정성을 위한 고분의 보존환경 기준을 요약하면 [그림 4.1]과 같다.



[그림 4.1] 고분의 보존을 위한 온도 및 습도 조건

미생물은 정적 pH, 온도, 습도, 영양분 등의 환경에 따라 성장활성이 나타난다. 실험 결과 영양분이 없는 의사시료의 경우 미생물의 성장활동이 온도 22℃ 및 25℃에서 낮게 확인되었으며 특히 온도 18℃에서는 의사벽체 표면의 미생물 성장활성이 거의 나타나지 않았다.

벽화의 마감층은 점토를 주로 사용하여 조성되었으며, 이러한 특징은 일반적으로 석회를 사용하여 제작된 고분벽화에 비하여 다공성이며, 점토 광물을 다량 함유하여 친수성(hydrophilicity) 및 팽윤성(swelling)의 특성을 가지므로, 수분에 대해 물리적으로 매우 취약하다.[37] 그러므로 습도의 변동은 벽화 마감층의 습윤(wetting)과 건조(drying)를 유발시켜 마감층 내부에 응력이 형성되어 결국 균열과 박리 등의 손상을 발생시킨다. 실험을 통해 상대습도 97% 이상의 조건에서는 마감층이 균열 등의 물리적 변화를 보이지 않았지만,

37) 이민영, 김대운, 정용재, *op. cit.*, p. 191.

상대습도 99%의 조건에서도 항온항습 챔버 내의 미세한 공기순환으로 인해 건조가 발생하는 것이 발견되었으나, 약 7주간 현장적용 실험에서는 시료의 물리적 변화가 발생되지 않았다.[38] 따라서 대상 고분의 벽화 마감층 보존을 위해서는 습도가 95%이하로 낮아지는 것은 위험할 것이다.

온도와 습도가 모두 낮을수록 미생물의 생장 가능성은 낮아지지만, 영하에 가까워지면 동결의 위험이 있으며, 낮은 습도는 벽체의 건조로 인한 균열의 원인이 된다. 그리고 온도와 습도의 변동이 생기면 벽체의 팽창과 수축의 반복으로 전돌의 균열 및 벽화 바탕층의 탈락이 발생할 수 있다. 이에 해당 고분 내 벽체 및 점토 마감층의 영양원 조건 등을 고려할 때 미생물의 성장억제를 위한 최적 온도 조건으로는 15-18℃의 온도가 유지되는 것이 적절할 것이며, 습도는 97-99%로 유지되는 것이 적절할 것으로 판단된다.[39]

38) Ibid., pp. 182-190.
39) 공주시, 공주대학교, *op. cit.*, pp. 193-169.

4.3 고분의 벽화 및 석실 보존 방안

국내외 고분 보존 사례 고찰을 통해 공조기를 설치해 고분 내부의 온도와 습도를 제어하는 것은 한계와 부작용이 있음을 확인하였다. 일반 건물이 아닌 자재와 벽체 구성에 대한 정보가 불충분한 고분은 공조기를 통한 제어가 예측할 수 없어 문화재 훼손으로 이어질 수 있다. 대상 고분 또한 습도를 낮추기 위해 열풍식제습기, 에어컨 및 제습기, 항온제습기를 설치한 이력이 있지만, 오히려 고분 내 온도와 습도 변동을 증가와 강한 토출기류로 인해 벽체의 열화를 촉진시켰다. 일본과 프랑스의 경우에는 간접적으로 공조를 하였으나 최종적으로는 기기를 통한 환경 조절에 성공하지 못하였다. 따라서 고분 내부 환경은 직접적인 공조가 아닌 패시브한 방법을 이용하여 외부 환경의 영향을 최소화하는 것이 최선으로 여겨진다.

고분의 벽화 보존을 위해서는 미생물이 생장하지 않으면서 벽체가 물리적 안정성을 유지할 수 있는 환경을 만들어야 한다. 미생물의 생장을 억제하기 위해 온도를 낮게 하고, 벽체의 건조로 인한 벽화의 탈락 및 균열을 막기 위해 높은 습도를 유지해주어야 한다. 앞서 이를 위한 보존환경은 온도 15-18℃, 습도 97-99%로 유지하는 것으로 밝혀졌다. 뿐만 아니라 기류로 인해 벽체 표면의 수분 증발과 벽체의 풍화를 방지하기 위해 인공적인 기류를 발생시키지 않도록 하는 것을 염두에 두어야 한다.

[그림 3.7]에서 고분 내부 온도가 18℃보다 높아지는 기간은 7월 초부터 11월 말까지로, 약 5개월의 기간에 해당한다. 6월부터 9월 말까지는 일 최저 기온이 18℃를 넘으며, 봉분의 축열 효과를 고려하면 그 이상의 기간 동안의 외부 환경의 영향을 차단한다면 고분 내부의 온도 상승을 줄일 수 있을 것이다. 고분에서의 열전달은 [그림 3.14]에 표현하였듯 일사, 봉분을 통한 전도, 틈새를 통한 침기가 있다. 그 외에 영향을 주는 인자로 사람의 출입에 따른

온도 변화가 있을 수 있다. 습도가 97%보다 낮아지는 기간은 1, 2, 4월에 몇 차례만 있었고, 이 시기에도 최저 상대습도는 93.5%이다. 기존의 고분 내 환경에서 습도는 크게 낮아지지 않으므로, 온도를 낮추는 것을 중심으로 보존 방안을 구상하였다.

패시브하게 온도를 낮추는 방법으로는 일사 및 열 차단(Solar and heat protection), 열 조절(Heat modulation), 방열(Heat dissipation)이 있다.[40] 이 중에서 일사, 봉분을 통한 전도, 틈새를 통한 침기로 인한 열 획득을 차단하는 것만으로도 고분 내부 온도를 상당히 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

일사를 차단한다면 천장을 포함한 고분 내 벽체의 온도 상승을 막을 수 있다. 일사를 차단하는 방법으로는 봉분 위에 차폐막, 반사형 단열재를 설치하는 방법 외에도, 주변 식재를 하는 방법이 있다. 고분은 관람을 위한 정비만이 진행되면서 주변 수목이 벌채되어 고분은 일사에 노출된 상태로 유지되고 있다. 주변 식재를 통한 음영(shading)과 증발산의 영향은 주변 온도를 최대 5℃까지 낮추어주는 것으로 알려져 있다.[41]

외부의 일사와 열을 차단하기 위해서는 봉분의 열전도율이 낮아지도록 단열재를 시공하여야 한다. 석실 내에서 서벽의 온도가 높은 이유 또한 고분 서쪽의 봉분 두께가 얇은 탓으로 봉분의 열저항을 높아지면 온도를 낮출 수 있다. 뿐만 아니라 외기의 영향이 감소하여 연교차도 감소하게 된다. 봉분의 열저항이 높아질수록 지중과 유사한 조건이 형성되면서 [그림 3.7]에서 바닥의 연중 온도 변화와 마찬가지로 평균 온도와 최고 온도가 낮아질 것이다. 봉분의 열전도율을 낮추는 방법으로는 단열재 설치 또는 봉분의 두께를 늘리는 방법이 있다. 그러나 고분의 벽체거동이 관찰되는바 봉분의 하중을 늘리는 것은

---

40) Santamouris, M., Passive Cooling of Buildings: The State of the Art, Advances on Solar Energy, London: Earthscan Publishers, 2005, pp. 1-34.

41) M. Kamal, An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions, Civil Engineering & Architecture, 2012, v55 n1, pp. 86-88.

바람직하지 못하다. 최대한 봉분의 무게를 증가시키지 않는 경량의 단열재 또는 필요에 따라 설치와 철거가 가능한 단열재를 적용시켜야 한다.

고분은 1997년에 폐쇄되었지만 출입문과 내부 창호가 모두 노쇠하여 외기의 영향을 차단하지 못하고 있으므로 기밀창호로 재시공하여 침기를 차단해야 한다. 풍향에 따른 고분 내부의 평균온도를 비교한 기존 연구에서고분 내의 출입문과 내부 창호가 기밀하지 못하지만 여러 개의 내부 창호가 존재하고 경사로가 형성되어 있어 출입구에 가까운 공간은 일부 영향을 받지만, 석실 내부에의 영향은 어느 정도 차단됨을 밝혔다.[42] 하지만 고분 내부의 온도는 미세한 차이에서 결로가 발생하거나 문제가 발생하므로 외기의 영향을 완벽하게 차단할 수 있도록 출입문과 고분 내 공간 사이의 영향을 막을 수 있도록 내부 창호의 교체가 필요하다. 사람의 출입 시 석실로 가는 중 각 공간을 지날 때 마다 지나온 창호를 닫은 후에 다음 공간으로 연결되는 창호를 열어 외부 환경의 영향을 차단해야 한다.

<표 4.2> 고분 내 온도 저감 방안

온도 저감 방안	내용
단열 성능 향상	봉분의 열저항을 높여 외부의 영향 감소
일사 차단	봉분 위 차폐막 설치를 통해 천장의 온도 상승 방지
	주변 식재를 통한 일사 차단
주변 환경 완화	주변 식재로 인한 봉분 주변의 최고기온 하강
침기 차단	출입문 교체를 통한 외부 환경의 차단
	내부 창호 교체를 통한 고분 내 공간별 영향 차단
출입 제한	인체 발열 및 출입 과정에서의 침기 발생 예방

42) 공주시, 공주대학교, *op. cit.*, p. 95.

추가적으로 사람의 출입에 의한 영향을 고려해야 한다. 1997년 고분 폐쇄로 보존을 위한 학술적 연구에 한해서만 출입을 제한하고 있어 고분 내부로의 출입이 잦은 것은 아니지만, 출입인원이 증가할수록, 재실 시간이 길어질수록 평균온도 및 절대습도가 일시적으로 상승하였다.[43] 인체에서 발생하는 열과 수증기 외에도 출입을 하는 동안 출입문의 개폐에 따라 침기량 또한 증가하게 되므로 출입에 관한 운영방침의 마련이 필요하다.

43) 공주시, 공주대학교, *op. cit.*

4.4 소결

본 장에서는 고분의 구성요소 중 벽화를 주요 보존 대상을 선정하고 훼손요인에 따른 해결방안을 제시하였다. 석실과 벽화의 보존을 위해서는 전돌의 물리적 안정성과 미생물의 생장 억제가 요구되며, 이를 위한 보존환경 기준은 기존의 연구 결과를 참고하여 정리하였다. 실측을 바탕으로 추론한 고분의 열과 수분의 이동 현상을 바탕으로 보존환경 기준을 만족시킬 수 있게 하는 보존방안을 제시하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 벽화고분의 주요한 보존 대상은 벽화이며, 벽화의 보존을 위해서는 벽화의 오염을 방지해야할 뿐만 아니라 벽화가 위치하고 있는 벽체의 물리적 안정성 또한 성립되어야 한다. 게다가 벽화고분은 일반 고분과 달리 다양한 묘실 구조를 가지고 있어 묘실 자체도 보존 대상에 해당한다. 문화재로 등재될 경우 고분의 보존은 원형유지가 기본원칙으로 봉분을 포함한 고분 전체가 보호되어야 한다.

(2) 벽화의 훼손은 오염과 탈락으로 발생할 수 있다. 벽화 오염의 원인은 미생물의 생장으로, 곰팡이와 세균 등 미생물이 분비하는 세포외 효소의 작용으로 인해 벽화의 색채가 손상 및 오염된다. 또한 미생물의 제거 작업 중에 벽화도 손상될 수 있다. 벽화의 탈락은 온·습도 변동, 수분의 흡수와 건조 등의 변화에 따라 팽창과 수축을 반복하여 균열 및 바탕층의 탈락이 발생하는 것이 원인이다.

(3) 문화재 중 박물관에서 보관되는 유물과 달리 고분은 아직까지 보존환경이 규정되어 있지 않다. 본 연구는 벽화 마감층과 재료적 특성이 유사한

조건의 의사시료를 제작하여 항온항습 챔버에서 변화를 관찰한 기존 연구를 참고하여 보존환경 기준을 규정하였다. 고분에서 발견된 미생물은 18℃ 이하의 온도에서 성장활성이 거의 나타나지 않았고, 벽화 마감층은 97-99%의 습도에서 균열 등의 물리적 변화가 발생하지 않았다. 온·습도의 변동은 수축·팽창을 유발할 수 있으므로 15-18℃, 97-99%의 환경을 유지하는 것이 바람직하다.

(4) 공조기를 통한 고분 내부의 환경 제어는 기존의 사례에서 한계와 부작용이 있으므로, 패시브한 방법으로 외부 환경의 영향을 최소화하는 것이 최선이라 판단하였다. 열전달 현상에 따라 온도 저감 방안으로 단열재 설치, 주변 환경 개선, 기밀창호 설치를 제안하였다. 뿐만 아니라, 사람의 출입에 따른 외기의 침입과 인체의 열·수분 발생의 영향을 최소화할 수 있도록 하는 출입에 관한 운영 방침을 정리하였다.

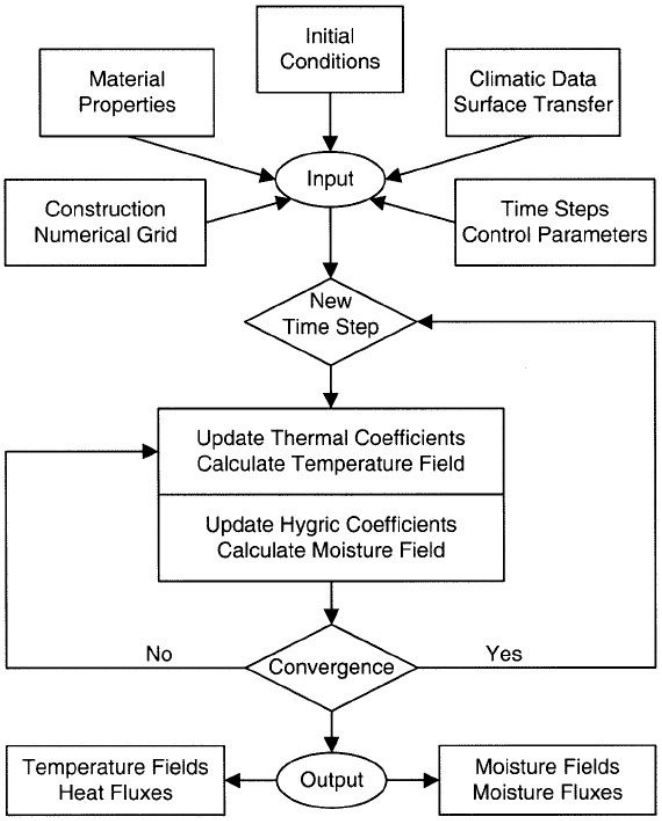
제 5 장 시뮬레이션을 통한 보존 방안의 검증 및 선정

본 장에서는 앞에서 도출된 고분의 보존 방안의 적용 타당성에 대해 전열·투습 해석 프로그램인 WUFI Plus를 이용하여 검증하였다. 일반 건물과 달리 봉분으로 덮여있어 토양수분이 고분 내부에 영향을 주는 환경적 특성을 고려하여 열과 수분의 이동 모두를 반영할 수 있는 시뮬레이션을 선정하였다. 일반 건축자재와 다른 특성을 가지는 토양의 특성, 봉분 내의 구성, 누수방지층, 강회다짐 등의 전통적 재료의 물성치 등 정확한 묘사는 불가능하지만 경향을 판단하고 여러 보존방안을 적용할 경우의 변화에 대해 추론할 수 있다. 기존의 관련 문헌과 도면을 참고하여 고분을 모델링한 후 보정을 하였으며, 외부의 기상 데이터는 앞서 실측된 데이터를 이용하였다. 문화재의 특성상 봉분을 포함한 고분 전체의 원형 상태를 보존할 수 있는 방안으로 시뮬레이션 케이스를 도출하였다.

5.1 시뮬레이션 개요

5.1.1 시뮬레이션 프로그램의 선정

봉분에 포함된 열과 수분에 따라 각 요소의 이동이 영향을 받는 고분 내 환경 변화를 분석하기 위해 독일의 IBP(Fraunhofer Institut Bauphysik)에서 만든 전열·투습 해석 프로그램 WUFI Plus를 활용하였다. WUFI Plus의 건물 모델링과 시뮬레이션 과정은 건물 모델링, 물성치 입력, 경계조건 설정, 시뮬레이션, 결과 분석 및 출력으로 [그림 5.1]과 같다.



[그림 5.1] WUFI Plus 프로그램의 계산 흐름도

전열 및 투습 해석 방법에는 건축물의 축열과 흡습에 의한 열적인 거동 해석 방법에 따라 정상(Steady state) 해석 방법과 비정상(Unsteady State) 해석 방법으로 구분할 수 있다. 정상 해석 방법은 재료의 축열 및 흡습 능력이 없는 것으로 가정하고 계산하는 방법으로서, 시간에 따른 축열체 내부에서의 온도변화 및 함수량의 변화를 무시하므로 재료 내에서의 열전달과 에너지 및 수분의 저장을 계산하기에는 부적합하다. 그러나 비정상 해석 방법은 재료의 축열 및 흡습 능력에 의한 시간에 따른 온도 및 수분 변화를 고려하므로 전열 및 투습 해석을 계산하기에 적합한 방법이라 할 수 있다.

축열 및 흡습 능력에 의한 시간에 따른 온도와 수분의 변화를 고려하기 위해 비정상(Unsteady state) 해석을 하며, 열평형방정식은 식(5.1), 수분 평형방정식은 식(5.2)와 같다.

$$\frac{dH}{d\theta}\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(\lambda\nabla\theta) + h_v\nabla\left(\delta_p\nabla\left(\varphi p_{sat}\right)\right) \tag{5.1}$$

$$\frac{dw}{d\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial t} = \nabla\left(D_\varphi\nabla\varphi + \delta_p\nabla\left(\varphi p_{sat}\right)\right) \tag{5.2}$$

여기서,

H : 전체 엔탈피[J/m^3]

θ : 온도 [K]

t : 시간 [s]

λ : 열전도율 [W/mK]

h_v : 상변화에 의한 잠열 [J/kg]

δ_p : 수증기 투과율 [kg/msPa]

φ : 상대습도 [%]

p_{sat} : 포화수증기압 [Pa]

w : 함수량 [kg/m^3]

D_{φ} : 액체 전도 계수 [kg/ms]

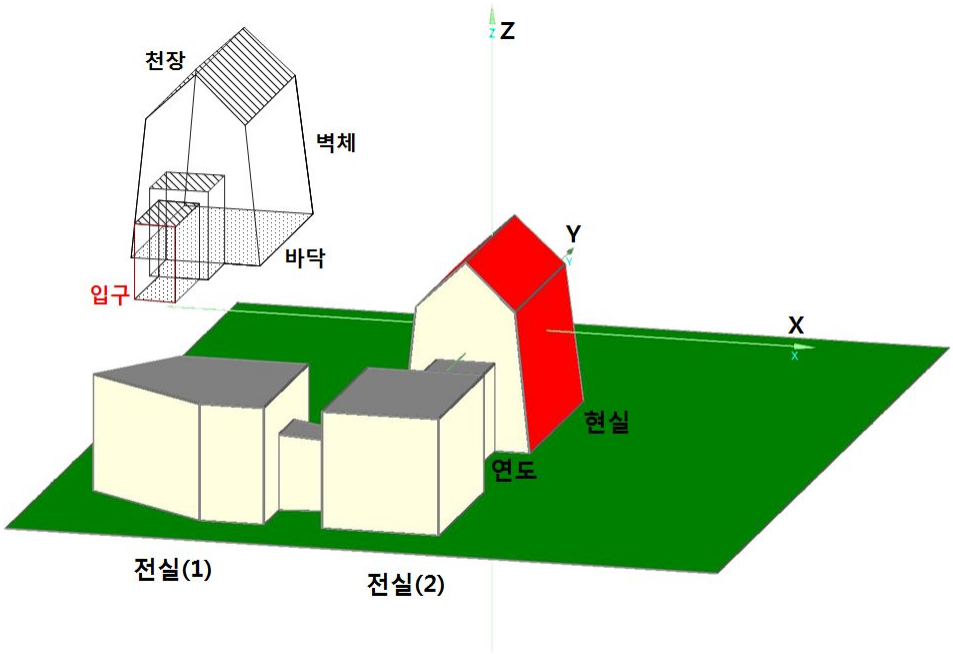
5.1.2 시뮬레이션 모델

선정한 시뮬레이션 프로그램인 WUFI Plus를 이용한 건물 모델링을 비롯한 시뮬레이션 계산 전의 과정과 입력한 내용은 다음과 같다.

(1) 건물 모델링

대상 고분은 정밀조사 과정 중 3차원 정밀실측[25] 등 몇 차례 측정이 이루어졌지만 정밀한 도면이 존재하지 않는다. 인위적인 환경 변화와 불량한 배수로 인한 주변 지반 및 내벽의 물성치 변동에 의해 벽체 거동[26]이 발생하므로 정확한 도면의 작성이 불가능하지만, 봉분의 부피에 비해 고분 내부의 용적은 크지 않으므로 형태를 단순화하여 [그림 5.2]의 형태로 모델링하였다. 현실의 폭과 깊이는 각각 2.2m, 3.6m로 연도를 포함한 총 면적은 10.14m^{2}이다.

25) 혜안미디어, 공주시 송산리고분군 6호분 3차원 기록 및 실측 결과보고, 2009, pp. 1-17.
26) 서만철, 박은주, 경사도변화 계측을 통한 백제 송산리 고분군의 지하 벽체거동특성과 안정성, 대한지질공학회, 1997, 7(3), pp. 191-205.



[그림 5.2] 시뮬레이션에 의한 모델링

(2) 물성치 입력

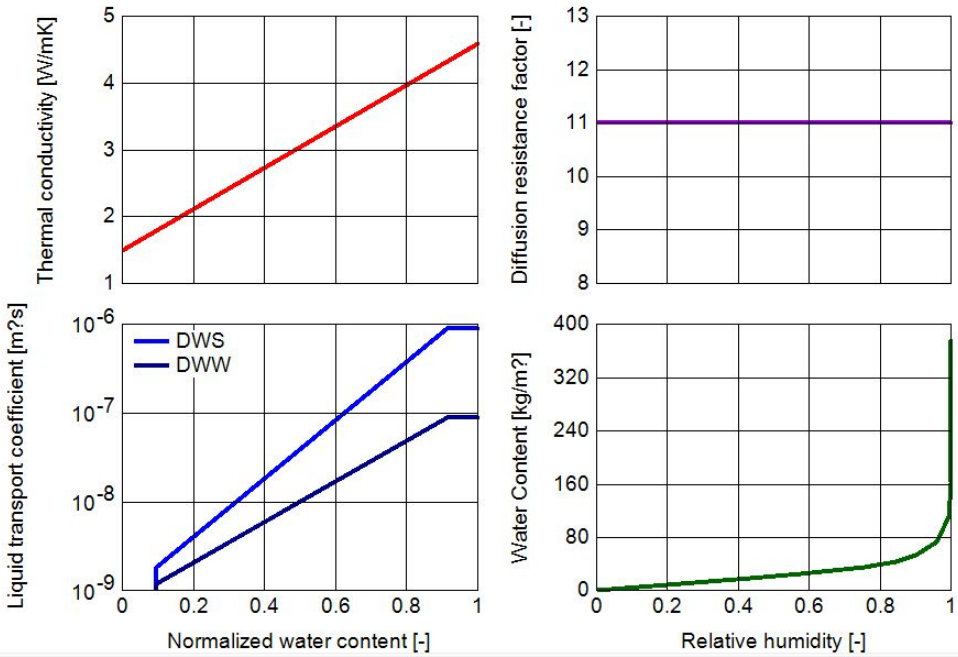
전체 형태를 구현한 다음 벽체 구성(assembly) 및 벽체를 구성하는 재료들의 물성치를 입력한다. 해석에 있어 고분의 벽체는 전돌 외에도 그 위의 봉분까지 모두를 포함한다. 벽체 구성은 기존 연구 자료를 참고하여 축조 방법, 누수방지시설 및 보수공사 등을 참고하여 봉분의 구성을 추측하여 프로그램에서 제공하는 재료 중 유사한 재료를 선택하여 벽체를 구성한 후 시뮬레이션을 하고 실측된 고분 내 환경과 비교하여 보정하였다. 물성치의 내용은 [그림 5.3]과 같다. 향별로 봉분의 두께 차이가 있으나 정확한 구현이 불가능하며 계산의 편의를 위해 <표 5.1>과 같이 천장, 벽, 바닥 세 가지 요소로 분류하였다.

<표 5.1> 고분 해석을 위한 요소별 시뮬레이션 입력값

항목	벽체 구성(외부-내부 순)	Climate on Outer Surface
천장	봉토-강회다짐-전돌	외기
벽체	보토다짐-심물다짐-진흙다짐-봉토-강회다짐-전돌	외기
바닥	응회암-전돌	지중
입구	-	전실

Material: Clay Mortar3

Bulk density	[kg/m?]	1568	Typical built-in moisture	[kg/m?]	375
Porosity		0.41	Reference water content	[kg/m?]	39
Specific heat capacity	[J/kgK]	488	Free water saturation	[kg/m?]	375
Thermal conductivity	[W/mK]	1.4837	Water absorption coefficient	[kg/m쐈^0.5]	0.183
Water vapour diffusion resistance factor		11	Thermal conductivity supplement	[%/M.-%]	8
			Color		

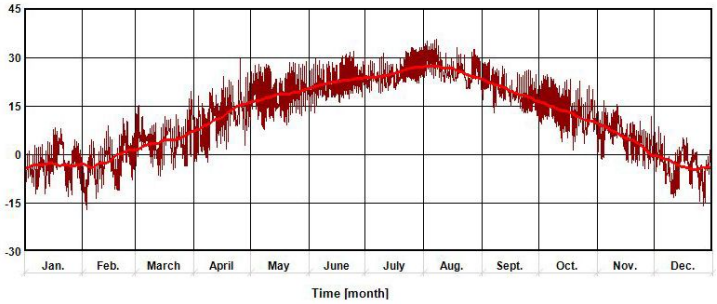
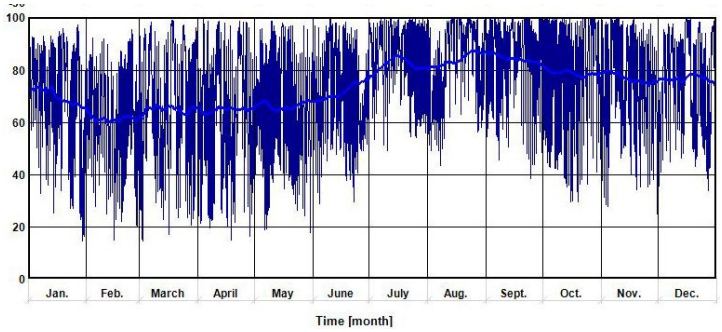


[그림 5.3] 시뮬레이션 프로그램 내 전돌의 물성치

(3) 경계조건 설정

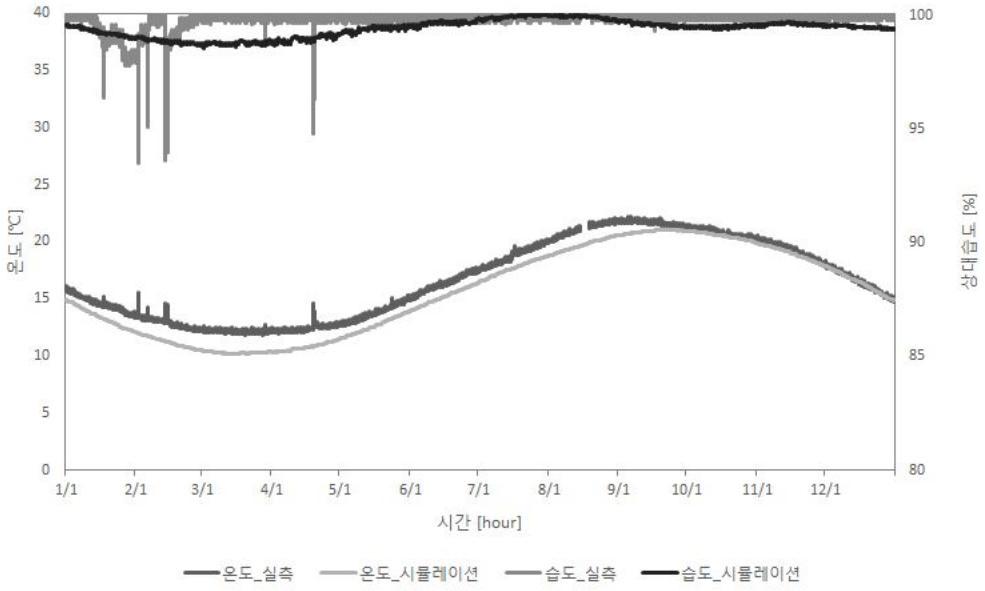
프로그램에서 제공하는 기상 데이터가 아닌 송산리 고분군에서 측정한 데이터를 이용하여 기상데이터를 만들었다. 기상 데이터는 온도와 습도 외에도 해당 지역의 위도와 경도, 일사량, 강수량, 풍향, 풍속을 포함한다. 지중과 전실의 온도는 선택적 기상 데이터(optional climate)로 연평균 온도와 실측 데이터를 바탕으로 정의한 후 보정을 하였으며, 그 결과 최종적으로 사용된 선택적 기상 데이터는 <표 5.2>와 같다. 전실은 실측 데이터를 기반으로 온도는 평균 16℃에서 6℃의 변화가 있는 것으로, 습도는 92.7-98.7%의 변화가 있도록 하였다. 출입문이나 배수로 등 기밀하지 못한 상황을 반영하여 보정 결과 0.3회/h의 침기를 기본값으로 적용하였다.

<표 5.2> 시뮬레이션 내 기상데이터 입력값

항목		온도 [℃]	상대습도 [%]
외부 기상			
선택적 기상	전실		
	지중	17.5	99%

(4) 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션 기간은 1년으로 하였고, 계산 간격은 측정된 데이터와의 비교를 위해 1시간으로 하였다. 정확도는 온도와 습도 각각 0.5℃, 0.5%이다. 앞서의 과정을 통해 모델링한 대상 고분의 시뮬레이션 결과는 [그림 5.4]와 같다.



[그림 5.4] 대상 고분 모델링 후 시뮬레이션 결과

5.1.3 시뮬레이션 케이스

<표 3.1>의 보존연혁과 답사를 바탕으로 봉분 조정, 창호의 기밀성, 주변 환경 정비, 내부 관람과 폐쇄 등 발굴 후 고분에 적용된 변화에 따른 6호분 내 환경의 변화를 분석하여 보존을 위한 전략을 도출하고자 하였다. <표 4.2>의 온도 저감 방안을 바탕으로 도출한 시뮬레이션 케이스는 <표 5.3>과 같다.

<표 5.3> 시뮬레이션 모델링 케이스

구분	시뮬레이션 변경 내용
단열 성능 향상	봉분 위 단열재1 (Heat-Insulation Clay) 시공
	봉분 위 단열재2 (Polystyrene Insulation) 시공
	봉분 두께 1m 증가
	봉분 두께 5m 증가
일사 차단	일사량 데이터를 생략
주변 환경 완화	외기온을 1℃ 낮추어 입력
	외기온을 5℃ 낮추어 입력
침기 차단	침기가 완전히 차단된 것으로 계산 (0회/h)
출입 제한	2인, 2시간(13:00-15:00) 1회 출입
	2인, 9시간(10:00-19:00) 1회 출입
	5인, 2시간(13:00-15:00) 1회 출입
	2인, 2시간(13:00-15:00) 매주 1회 출입

봉분의 단열 성능에 따른 효과를 분석하고자 봉분 위에 단열재를 설치할 경우의 효과를 계산하고자 한다. 시뮬레이션에 적용한 단열재는 기존의 봉분과 어울리도록 흙을 사용할 경우와 일반적으로 사용되는 단열재인 스티로폼 1cm를 시공할 경우로 나누었다. 고분이 지하와 같은 조건이 될 경우를 분석하고자 실현 불가능하지만 봉분 두께를 증가시킬 때의 변화도 분석하였다.

<표 5.4> 단열재 설치 및 두께 변화에 따른 봉분의 U-Value

항목	U-Value [W/mK]	두께 [m]
기본상태	0.17	3.01
단열재1 (Heat-Insulation Clay)	0.14	3.10
단열재2 (Polystyrene)	0.1	3.11
두께 1m 증가	0.13	4.01
두께 5m 증가	0.06	8.01

주변 식재로 인한 음영(shading)과 증발산의 영향은 주변 온도를 최대 5℃까지 낮추어준다[27]는 연구를 바탕으로 발굴 및 정비 이전에 주변 온도가 지금보다 낮아지는 경우와 일사의 영향이 전혀 없을 경우를 가정하여 인위적으로 기상데이터를 생성하여 계산 하였다. 기밀 성능 향상 시의 변화는 기본상태의 0.3회/h를 0회/h로 변경하여 시뮬레이션하였다.

개방되어 있는 동안의 꾸준한 관람객의 출입과 폐쇄 이후의 보존 작업을 위한 출입으로 인한 인체 발열, 가습 등의 영향을 분석하였다. 재실자로부터의 열 획득은 프로그램에서 제공하는 인체에서 발생하는 열과 수분의 양은 <표 5.4>와 같으며, 이 중에서 성인이 앉아서 일하는 경우를 기준으로 하였다. 현재 대상 고분은 연구 목적의 경우에도 재실 인원을 최대 2명으로 제한하고 있기 때문에, 2인을 기준으로 온도가 높은 9월 16일에 출입할 경우 재실시간에 따른 온도와 습도 변화를 계산하였다. 또한 폐쇄 전에 비해서는 미미하겠지만 2명의 사람이 매주 2시간씩 작업을 할 경우도 함께 시뮬레이션하였다.

<표 5.5> Nominal heat gain values from occupants

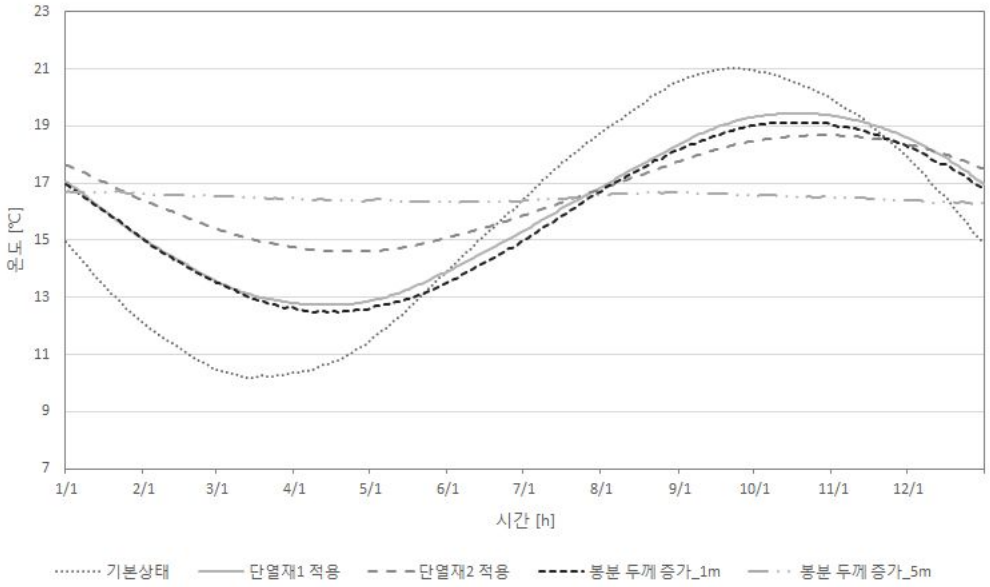
Activity		Moisture [g/h]	Heat [W]	
			Convective	Radiant
Adult	middle activity	123	158	47
	sitting, realaxed	120	75	45
	sitting, working	145	75	70

27) M. Kamal, An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions, Civil Engineering & Architecture, 2012, v55 n1.

5.2 시뮬레이션 결과 및 분석

(1) 봉분의 단열 성능 향상

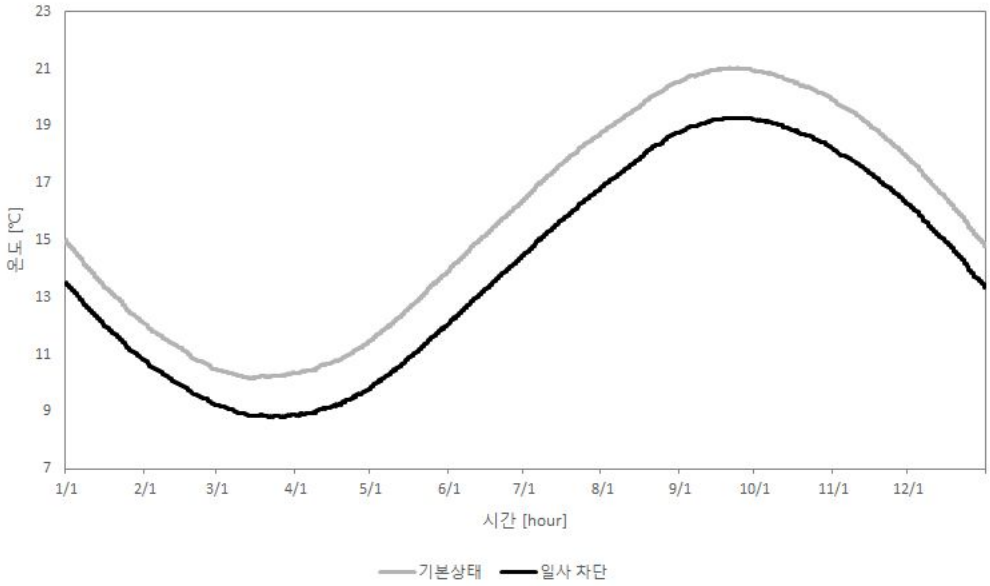
[그림 5.4]에서 봉분 위 단열재를 시공하여 외피의 열전도율을 낮추면 고분 내부의 열적 안정을 이루게 하는 효과가 클 것으로 예상할 수 있다. 봉분의 열저항이 높아짐에 따라 고분 내 환경의 변화가 감소와 시간지연이 길어지는 효과가 있다. 1cm 두께의 스티로폼 수준의 단열 효과가 더해지는 것으로 연교차는 4.1℃가 되었으며, 9월 초부터 12월 중순까지의 기간만 18℃를 초과하며 최고온도는 18.7℃가 된다. 봉분의 두께를 늘리는 것은 석실에 가해지는 하중을 증가시켜 구조적인 문제를 일으킬 수 있으므로 적합한 보존방안이라 할 수 없다. 고분 내 온도가 일정해지면 습도 또한 일정해지므로 보존환경 조성에 효과적이다.



[그림 5.5] 봉분의 단열 성능에 따른 고분 내 온도 변화

(2) 일사 차단

현실적으로 불가능하지만 일사가 전혀 존재하지 않는다는 극단적인 가정하에 시뮬레이션을 하였으며, 그 결과는 [그림 5.6]과 같이 1.2-2.0℃ 정도 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 연교차는 크게 감소하지 않지만 시뮬레이션에서의 경우 고분 내 온도가 18℃를 넘는 기간이 8월 18일 10:00에서 11월 4일 20:00으로, 기존에 비해 약 53일 위험기간이 단축되었다. 일사를 차단하면 장기적으로 봉분 내 축열이 감소하여 고분 보존에 도움이 될 것으로 예상된다.



[그림 5.6] 일사 차단에 따른 고분 내 온도 변화

(3) 주변 환경 완화

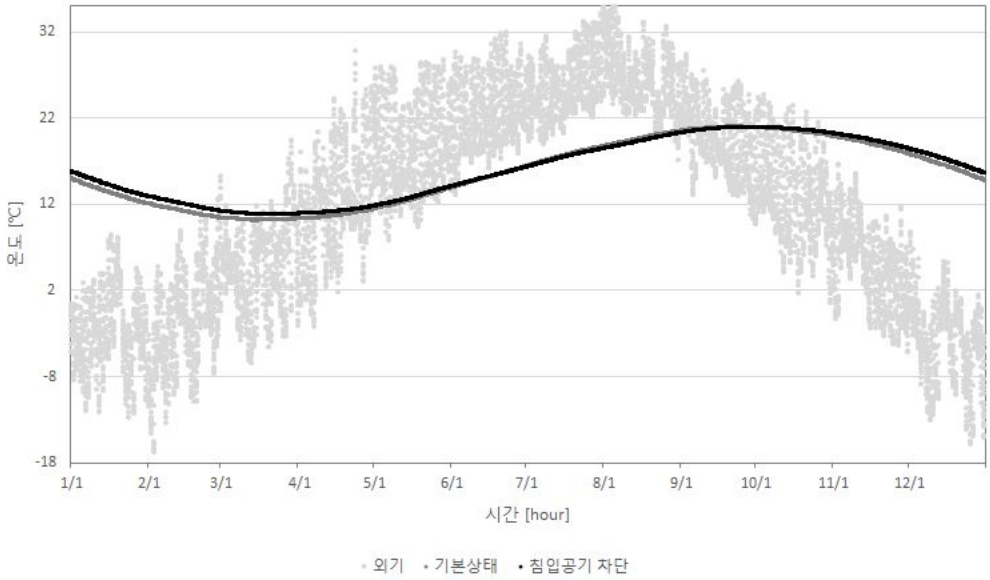
식재 및 일사 차단 등에 의한 주변 환경의 변화의 정확한 예측은 불가능하지만, 외기온의 변화에 따라 고분 내부의 최고·최저온도가 모두 낮아졌다. 단순히 외기의 온도를 낮추어 입력하여 정확한 분석이 되지 못하지만 외기온 완화에 따른 고분 내부의 온도 변화는 시간이 지날수록 효과가 뚜렷하게 나타날 것으로 예측된다.

<표 5.6> 주변 환경 완화에 따른 고분 내 온도 변화

조건		기본상태	외기 1℃ 하강	외기 5℃ 하강
최고	온도 [℃]	21.0	20.5	18.4
	날짜	3월 14일	3월 14일	3월 22일
최저	온도 [℃]	10.2	9.7	7.7
	날짜	9월 21일	9월 24일	9월 24일
평균	온도 [℃]	15.7	15.1	13.1

(4) 기밀 성능 향상

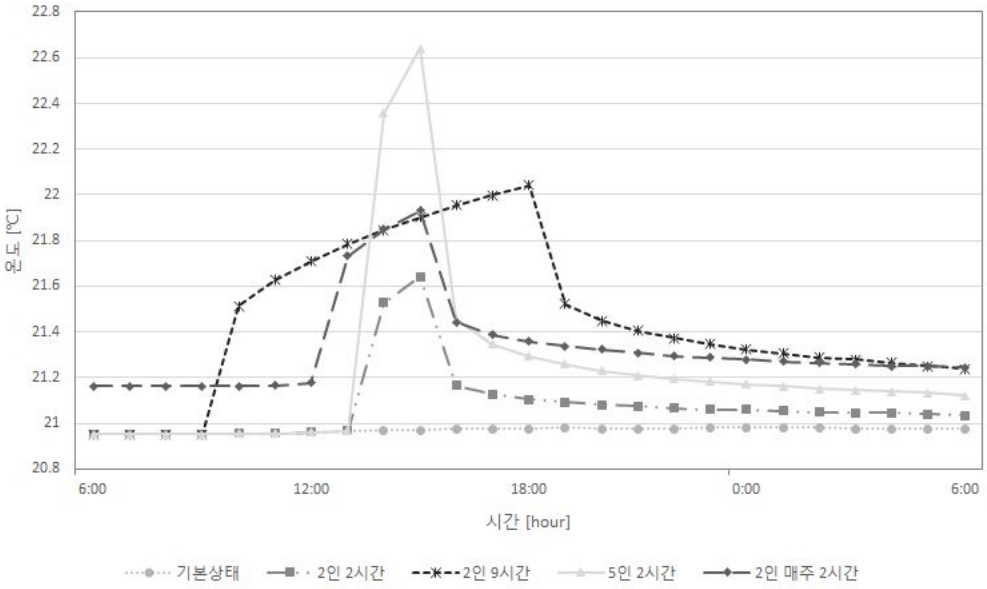
침기를 완벽하게 차단하기만 해도 고분 내부 환경을 안정시키는데 도움이 되는 것을 [그림 5.6]에서 확인할 수 있다. 연중 침입공기가 완전히 차단된다면 연교차가 감소된다. 하지만 외기온이 고분 내부보다 낮은 시기의 영향도 차단되어 11-4월 즈음에는 외기보다 온도가 높아진다. 1년간의 온도 변화를 볼 때 온도가 낮아지기보다는 연교차가 감소하였다. 외기의 온도가 고분 내 온도보다 높은 시기에는 입구통로와 배수로를 타고 상승기류로 외기가 유입되기 쉬우며, 고분 내부 온도를 높이게 되므로 이 시기의 기밀에 주의해야 할 것이다.



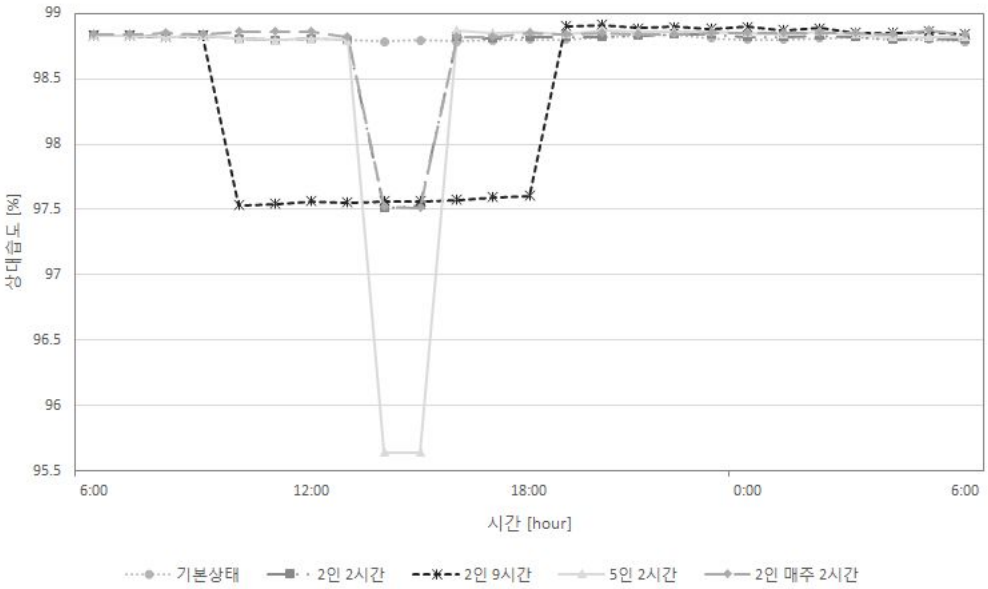
[그림 5.7] 기밀 성능 향상에 따른 고분 내 온도 변화

(5) 출입 빈도 및 재실 시간에 따른 영향

고분 내 온도가 높은 9월 중순에 사람이 출입하는 경우를 나타내었다. 사람의 출입에 따라 0.67-1.67℃ 정도의 온도 상승이 생기며, 온도가 높아지면서 순간적으로 상대습도는 낮아지는 것을 [그림 5.7]과 [그림 5.8]에서 확인할 수 있다. 출입 인원이 많아지면 온도 상승과 상대습도 감소가 더 심화된다. 특히 이 시기에는 외기온 또한 높기 때문에 출입 시 침기량이 증가하면 고분 내 온도는 더 높아질 것으로 예상된다. 주기적으로 출입할 때에는 인체발열이 제거되지 못하여 평균적으로 온도와 습도 모두 높은 상태를 유지하였다.



[그림 5.8] 재실 시간 및 빈도에 따른 온도 변화 (9월 16일 6:00-9월 17일 6:00)



[그림 5.9] 재실 시간 및 빈도에 따른 습도 변화 (9월 16일 6:00-9월 17일 6:00)

5.3 소결

본 장에서는 앞에서 제시된 고분의 보존 방안을 전열·투습 해석 프로그램을 이용하여 그 효과를 분석하였다. 봉분에 포함된 열과 수분에 따라 각 요소의 이동이 영향을 받으므로 고분 내 환경 변화를 분석하기에 적합한 프로그램을 선정하고 기존의 관련 문헌 참고와 보정을 통하여 모델링하였다. 이를 통해 제시된 보존 방안을 적용할 때, 보존환경으로 도출된 온도와 습도 조건이 안정적으로 유지되는지의 여부와 위험기간의 온도가 기준 온도 이상으로 높아지지 않는 지, 습도가 낮아지지 않는지를 평가하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 일반 건물과 다른 고분의 내부 환경의 변화를 분석하기 위한 시뮬레이션 프로그램으로 WUFI Plus를 선정하였다. 이는 축열과 흡습에 의한 시간에 따른 온도 및 수분 변화가 반영되는 비정상 해석을 통해 전열 및 투습 계산이 요구되는 시뮬레이션 해석을 수행할 수 있다. 시뮬레이션 과정으로는 건물 모델링, 물성치 입력, 경계조건 설정, 시뮬레이션, 결과 분석 및 출력이 있다.

(2) 시뮬레이션을 통한 모델링은 정확한 묘사는 불가능하지만 기존의 문헌과 도면을 참고하였다. 고분 형태와 물성치, 경계조건 모두 정확하지 않은 부분은 보정을 통해 입력값을 정하였다. 기본상태의 모델링 결과 실측한 데이터와 다소 차이가 있지만 보존방안 적용에 따른 고분 내부의 온도와 습도의 변화 경향을 판단할 수 있었다.

(3) 앞서 제안한 온도 저감 방안인 단열 성능 향상, 일사 차단, 주변 환경 완

화, 침기 차단, 출입 제한을 기준으로 시뮬레이션 케이스를 분류하였다. 사용한 프로그램의 특성상 일사 차단, 주변 환경 완화에 관한 시뮬레이션에서는 다소 비현실적인 가정을 하여 시뮬레이션을 수행하게 되는 한계점이 있었다. 고분 보존을 위해서는 육안 관측, 오염 물질 제거 등을 위해 고분 내에 출입해야하는 때가 있으므로 사람의 출입 인원과 재실 시간에 따른 영향을 시뮬레이션하였다.

(4) 적용한 보존방안 중에서는 단열 성능 향상시키는 것이 가장 효과적이었으며, 그 중에서 봉분의 열전도율이 0.06W/mK가 되면 고분 내 연교차까지 감소하여 제안한 보존환경인 15-18℃를 벗어나지 않는 상태가 되었다. 일사의 차단과 주변 환경의 완화는 장기적으로 유지할 때 효과가 나타날 것으로 예측된다. 부식, 노쇠되어 기밀하지 못한 출입문과 내부 창호를 교체하여 외기의 영향이 차단되는 경우 연간 온도 변화는 감소하였으나 온도 저감에는 효과가 없었다. 고분 내부에 사람이 출입할 때는 인체의 발열로 온도가 높아지며 순간적으로 상대습도가 낮아졌다. 불가피하게 고분 내에 사람이 출입해야할 때에는 인체 발열 등의 영향을 차단할 수 있도록 하는 운영방침이 마련되어야 할 것이다.

제 6 장 결 론

본 연구는 문화유산 중 외부환경에 노출된 상태에서 보존되어야 하는 고분의 보존 방안을 제시하고자, 고분의 온·습도 환경 분석을 바탕으로 고분의 열·수분 이동 메커니즘과 보존을 위해 요구되는 환경조건을 도출하였고, 이를 바탕으로 보존을 위한 환경조건을 만족할 수 있는 방안을 마련하였다. 이를 위하여 문화재의 보존환경과 고분 보존 사례를 조사하여 고분의 보존환경 조건을 정의한 후 고분의 보존 전략을 도출하고 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 문화재의 보존환경과 고분 보존 사례를 고찰하였다. 문화재의 훼손은 상대습도의 변화에 따른 물체의 팽창과 수축, 높은 습도에서의 화학적 반응과 미생물 번식 등이 있다. 온도의 변화는 직접적인 영향은 없으나 습도의 변화를 일으킬 수 있다. 기존의 고분 보존 연구에서도 온도 상승과 습도 변화를 훼손의 주요 원인으로 여겨 발굴 전 상태로 만드는 것을 보존의 목표로 삼고 있었다. 국외 고분의 보존 사례를 통해 훼손의 원인으로는 높은 습도와 결로 발생, 사람의 출입, 그리고 공조기기의 제어 및 노후화가 있다.

(2) 일정 규모의 벽화가 존재하는 고분을 선정하여 보존연혁을 공조기 설치에 따른 고분 환경의 변화를 중심으로 분석하였다. 이어 고분 내부 환경 실측을 통하여 외부 환경의 변화에 따른 고분 내부 환경의 변화와 고분 내부의

미기후 환경을 분석하였다. 일반적인 열과 수분의 이동 현상에 대한 이론을 바탕으로 고분에서 봉분을 통한 열의 전도, 수증기의 확산, 액체의 모세관 전도와 밀실하지 못한 틈새를 통한 기류로 열과 수증기가 이동할 것이다. 고분 축조 방식과 누수방지층을 시공한 것을 참고할 때, 강우의 누수와 지하수 상승으로 인한 유입은 발생하지 않을 것으로 추측하였다.

(3) 고분의 보존 대상은 벽화로, 벽화 훼손을 방지하기 위해서는 벽체의 물리적 안정성과 미생물의 생장 억제가 전제되어야 한다. 이를 위한 환경 조건은 고분 내 벽체와 유사한 의사시료 제작하여 항온항습 챔버와 고분 내 배치를 통한 온·습도 조건에 따른 변화를 관찰한 기존 연구의 결과를 참고하였다. 온도는 낮아질수록 미생물 생장이 억제되지만 습도는 벽체의 안정성을 위해 높은 상태를 유지하는 것이 바람직하다. 고분의 벽화 훼손을 방지하기 위해서는 습도 97-99%, 온도 15-18℃의 보존환경이 유지되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 공조기를 통한 고분 내부의 환경 제어는 기존의 사례에서 보았듯 한계와 부작용이 있으므로, 패시브한 방법으로 외부 환경의 영향을 최소화하는 것이 최선이다. 봉분의 토양수분으로 인해 제습을 하지 않는 자연상태에서 고분 내의 습도는 97% 이상으로 유지될 것이다. 온도가 18℃ 이상인 기간의 온도를 낮출 수 있는 방안을 제시하였다. 온도 저감 방안으로 단열 성능 향상, 일사 차단, 주변 환경 완화, 침기 차단을 제안하였다. 사람의 출입에 따른 외기의 침입과 인체의 열·수분 발생의 영향을 최소화할 수 있도록 하는 출입에 관한 운영 방침을 정리하였다.

(5) 전열·투습 해석 프로그램으로 WUFI Plus을 선정하여 모델링 후 보존 방안 적용에 의한 고분 내부 환경 변화를 시뮬레이션하였다. 기존의 관련 문헌과 도면을 참고하였고 자료가 부족한 부분은 보정을 통하여 입력값을 정하였다. 이를 통해 제시된 보존 방안을 적용할 때, 적용 타당성의 판단 기준으로 도출된 온도와 습도가 안정적으로 유지되는 환경의 확보 여부와 위험기간의 온도가 기준 온도 이상으로 높아지지 않는지, 습도가 낮아지지 않는지를 평가하였다.

(6) 시뮬레이션 결과, 단열 성능 향상시키는 것이 고분 내부 환경의 변화를 최소화하는데 있어 가장 효과적이었다. 봉분의 열전도율이 낮아질수록 고분 내 연교차 또한 감소하여 제안한 보존환경인 15-18℃를 벗어나지 않는 환경을 조성할 수 있다. 일사의 차단과 주변 환경의 완화는 내부 온도가 낮아졌고, 출입문과 내부 창호를 기밀창호로 교체할 경우 연간 온도 변화는 감소하였으나 연간 온도 하강에는 효과적이지 못했다. 고분 내부에 사람이 출입할 때는 인체의 발열로 온도가 높아지며 순간적으로 상대습도가 낮아졌다. 불가피하게 고분 내에 사람이 출입해야할 때에는 인체 발열 등의 영향을 차단할 수 있도록 하는 운영방침이 마련되어야 할 것이다.

이상의 내용에서 발굴된 현장에서 보존되어야 하는 고분의 보존 방안을 논의하였다. 고분의 보존에 관한 연구는 아직까지 많이 진행되지 않았으며, 고분의 보존환경이 정의된 바는 없다. 본 연구는 송산리 고분의 내부 환경 분석을 통하여 고분 보존 전략을 제시하였다.

그러나 고분은 축조 방식과 구성, 주변 환경에 따라 보존환경이 상이하기에, 훼손 중인 고분의 보존을 위해 지속적인 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 현

재에 최적이라고 판단되는 보존안도 몇 년이 지나면 고분에 부작용이 될 수 있으므로, 지속적인 모니터링이 필요하다. 무리한 직접적인 공조 방식이 아닌 패시브한 방안으로 고분 내 미생물 발생과 벽체의 물리적 안정성을 유지하면서, 일관성 있고 지속적인 연구가 이루어져야한다.

참 고 문 헌

1. 강대일. 문화재와 보존환경. 보존과학기초연수교육. 국립문화재연구소. 2003. pp. 91-119.
2. 강종원. 충청남도 백제 문화재의 체계적 보존관리 및 활용방안(연구보고서). 충남발전연구원. 2002.
3. 공주시, 공주대학교. 공주 송산리 고분군 친환경 공조시스템 개발(연구보고서). 2014.
4. 공주시, 한국전통문화대학교. 공주 송산리 고분벽화 보존방안 연구(연구보고서). 2012.
5. 김경대. 경주 고분군 지구의 보존방향 연구: 일본 고분군 보존사례를 참고하여. 경주연구. 2013. v22 n2. pp. 1-20.
6. 김기웅. 『고분』. 서울: 대원사. 1991.
7. 김병호, 정형균. 순흥읍내리 벽화고분 보존처리. 보존과학연구 v7. 1986. pp. 264-274.
8. 김철주. 청주 신봉동 고분군의 보존과 정비 방안에 관한 연구. 백제학보. 2012. v8. pp. 215-239.
9. 문화체육부. 박물관 내 전시 및 수장 공간의 공조환경 기준 연구(연구보고서). 대한민국 문화체육부. 1996.
10. 법제처. 문화재보호법. 법률 제11228호. 2012.
11. 서만철, 이창환, 정계옥, 김동현. 송산리 고분군의 지구물리학적 조사를 통한 고분축조방법 고찰. 보존과학회지. 1997. v6 n1. pp. 61-70.
12. 안진환. “발굴유구 보존에 대한 연구”. 영남대 대학원 석사학위 논문. 2008.

13. 윤지향. “문화유산의 보존과 활용에 관한 연구: 나주 복암리고분전시관 건립을 중심으로”. 석사학위논문. 목포대학교. 2006.
14. 정상기. 일제강점기 공주 송산리고분의 조사. 중앙고고연구. 2012. v10. pp. 249-292.
15. 이민영, 김대운, 정용재. 공주 송산리 고분 내 미생물 분포 및 보존환경 연구. 보존과학회지. 2014. v30 n2. pp. 169-179.
16. 이오희. 『문화재 보존과학』. 서울: 주류성. 2009.
17. 이주헌. 고도경주의 문화재보존과 활용: 경주 월성과 쪽샘지구 신라고분을 중심으로. 고문화. 2013. v81. pp. 61-85.
18. 한경순. 공주 송산리 6호분 벽화의 제작기술 고찰. 보존과학회지. 2011. v27 n4. pp. 451-458.
19. Garry Thomson. 『The Museum Environment』 2nd ed. London: Butterworth-Heinemann. 1986.
20. ASHRAE. 『2011 ASHRAE Handbook HVAC Applications』. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioing Engineers, 2011.
21. GUYON P.M. Climatomology Problems in Lascaux. 2009.
22. H.M. Künzel. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-dimensional Calculation using Simple Parameters. IRB-Verlag Stuttgart. 1995.
23. Ishizaki T. et al. Thermal and Moisture Characteristics of Takamatsuzuka Tumulus and Its Cooling. 2008. pp. 17-22.
24. Lee J.H. et al. Indoor Environmental Analysis of the Ancient Tumulus. ICEERB. 2014.

25. Li, Y. et al. Predicting Hygrothermal Behavior of an Underground Stone Chamber with 3-D Modeling to Restrain Water-Related Damage to Mural Paintings. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2014. pp. 499 - 506.
26. Li, Y., Ogura, D., Hokoi, S., & Ishizaki, T. Study on Conservation of Mural Paintings in Tumulus: Numerical Analysis of Heat Behaviors of Stone Chamber after Excavation. Frontiers of Architectural Research, 2012. v1 n4. pp. 375 - 379.
27. Malaurent P. et al., Contribution of Numerical Modelling of Environmental Parameters to the Conservation of Prehistoric Cave Paintings: the Example of Lascaux Cave. Conservation and Management of Archaeological Sites. 2007. v8 n2. pp. 59-76.
28. M. Kamal. An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions. Civil Engineering & Architecture. 2012. v55 n1. pp. 84-97.
29. Mimura, M., & Yoshimura, M. Geotechnical Properties of Takamatsuzuka Tumulus and its Stability. 2008. pp. 83 - 92.
30. Noblecourt A. Protection of Cultural Property in the Event of Armed Conflict. UNESCO. 1956.
31. Ogura, D. et al. Control of Temperature and Humidity Surrounding the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus during its Dismantlement. 2008. pp. 75 - 81.
32. Ogura, D. et al. Analysis of Temperature and Humidity Variation in the Stone Chamber of Takamatsuzuka Tumulus from its discovery

until its dismantlement. 2009. 過去の高松塚古墳石室内の溫濕度変動解析 (in Japanese).

33. Suh., M.C., Koo, M.H., & Choi, S.W. Instability of an Underground Ancient Tomb due to Excavation and its Relationship to the Temperature and Ground Water. Geotechnical and Geological Engineering, 2004. v22. pp. 269-283.

34. William A. Jury, Robert Horton. 『Soil Physics』 6th ed. JOHN WILEY&SONS, INC. 2004.

ABSTRACT

Conservation Method for Stone Chamber and Mural Paintings through the Analysis of the Internal Environment in the Ancient Tomb

By Kim, Ji Min
Department of Architecture and Architectural Engineering
Master Course in the Graduate School of
Seoul National University
Advised by Professor Kim, Kwang Woo
2015. 2.

Microorganisms deteriorate many ancient mural paintings drawn on tumulus after excavation. In order to preserve the tumulus, an air conditioning system is operated to keep the room temperature and humidity environment stable. However, the dehumidifier in the air conditioning system causes cracking of the ancient bricks and loss of mural paintings due to the fluctuating indoor thermal and moisture conditions.

In this paper, the ideal environmental conditions to maintain ancient

tombs are derived by reviewing existing research related to conservation. Conservation strategies are then identified by using the simulation tool, WUFI, and site measurements of the ancient tombs in Songsan-ri, Gongju. In order to protect ancient tombs from microorganisms and the subsequent loss of paintings and to prevent the cracking of the bricks, the temperature needs to be adjusted without lowering the humidity. In this situation, it would be more appropriate to apply passive cooling methods than to install an air conditioner. Consequently, this study proposes the lowering of the thermal conductivity of the mounds and limiting human access.

Keywords : Cultural Properties, Ancient Tomb, Preservation, Microclimate

Student Number : 2012-20553