공주 무령왕릉과 왕릉원 내부 미세변위 정밀모니터링을 위한 디지털 기록화 연구

A Study on Digital Documentation of Precise Monitoring for Microscale Displacements within the Tomb of King Muryeong and the Royal Tombs in Gongju, Korea

최일규, 양혜리, 이찬희*

공주대학교 문화재보존과학과

Il Kyu Choi, Hye Ri Yang, Chan Hee Lee*

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Korea

Received October 4, 2021

Revised October 28, 2021

Accepted November 2, 2021

*Corresponding author

E-mail: chanlee@kongju.ac.kr

Phone: +82-41-850-8543

Journal of Conservation Science
2021;37(6):626-637

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.6.02>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

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

초 록 공주 무령왕릉과 왕릉원은 세계유산으로 등재된 웅진백제시대(AD 475~538) 왕족의 고분군이다. 1971년 무령왕릉 발굴 이후 안전한 보존관리 체계 없이 공개됨에 따라 급격한 환경변화를 겪으며 고분 내부에 다양한 손상이 발생하였다. 이 연구에서는 왕릉원의 미세적 변위 분석을 위해 각 고분 내부에 취약부를 선정하여 3차원 정밀스캐닝을 바탕으로 디지털 형상정보를 구축하였다. 5호분에서는 진행성 변위를 검출하였으며, 6호분과 무령왕릉은 향후 모니터링을 위한 기초자료를 획득하였다. 특히 5호분 남측 회벽의 편차분석 결과, 공차범위 ± 18 mm와 ± 2 mm에서 추가 손상은 나타나지 않았다. 그러나 인방석은 평균 0.32 mm의 처짐이 발생하였고, 벽체 사이의 거리는 평균 0.36 mm가 증가하였다. 5호분 내부는 직접적인 누수가 있어 탈락과 처짐거동 등 손상을 가중시킨 것으로 해석된다. 이 연구에서 획득한 3차원 형상정보는 계속 연구를 위한 자료로 중요한 기준이 되며, 정밀 계측모니터링과 교차검증을 거쳐 왕릉원의 안정적인 보존방안을 검토하는 데 활용될 것이다.

중심어 왕릉원, 무령왕릉, 3차원 형상모델, 변위분석, 편차분석

ABSTRACT The tomb complex of the royal family from the period of the Ungjin Baekje Kingdom (475 to 538 AD) in Gongju, Korea, contains the tomb of King Muryeong and other royal tombs. After the excavation of the tomb of King Muryeong in 1971, these tombs were opened up to the public, without the establishment of systems for their safety, conservation and management. The tombs have consequently experienced rapid environmental changes and suffered various damages. In this study, specific vulnerable parts inside the tombs were selected for deviation analysis using 3D scanning, and 3D image models were constructed on this basis. Progressive displacement was identified in tomb No. 5, and basic data for future investigations was acquired from tomb No. 6 and the tomb of King Muryeong. In the deviation analysis for the southern plastered wall of tomb No. 5, the damage was not found to exceed the ranges of ± 18 mm and ± 2 mm. However, the lintel stone was found to be sagging by 0.32 mm on average, and the distance between the walls to have increased by 0.36 mm on average. Direct water seepage occurring in tomb No. 5 is considered to be increasing the damage within the tomb, such as the dropping and sagging of the lintel. The 3D image models constructed in this study will play an important role as baseline data for future research, and can be used to discuss a secure conservation scheme for the tombs through cross-validation with precise measurement monitoring.

Key Words Royal tombs, King Muryeong, 3D image model, Displacement analysis, Deviation analysis

1. 서 언

무령왕릉과 왕릉원은 충남 공주에 있는 고분군으로 웅진백제기에 재위하였던 왕과 왕족의 무덤이 모여 있는 곳이다. 최근까지 송산리고분군으로 불려왔으며, 역사적 및 학술적 가치를 인정받아 1963년 사적 제13호로 지정되었고, 2015년에 공주와 부여 및 익산의 대표적 백제유산과 더불어 유네스코 세계문화유산에 등재되었다.

1971년 무령왕릉이 발굴되면서 고분군 일대는 대대적인 정비가 이루어졌으며 1976년 2월부터 5호분과 6호분

및 무령왕릉의 내부가 일반에 공개되었다. 고분 내부는 체계적인 보존관리시스템이 미비한 상태에서 완전히 노출되었고, 급격한 환경변화를 거치며 누수와 벽화 탈락 및 미세거동과 같은 다양한 손상이 발생하였다(Suh *et al.*, 1997; Yoon, 2008; Kim *et al.*, 2020). 따라서 계속적인 모니터링과 보존과학적 정밀진단의 필요성이 대두되었고, 1996년부터 안정성 및 누수 제어 등에 대한 종합적 연구가 이루어지며 고분군은 영구 폐쇄되었다(Suh *et al.*, 1998; Suh, 1999).

무령왕릉과 왕릉원의 축조기법 및 변화에 대해서는

Figure 1. Monitoring zones in the tomb No. 5. (A to D) Plastered walls in the east, west, south and north sides, respectively. (E, F) Front and back views showing the lintel stone of burial entrance reinforced with supports.

Suh *et al.*(1997; 1998)에 의해 상세히 보고되었으며, 2011년에 내부 온습도 센서와 2013년에 거동센서 설치를 기반으로 고분 내부의 모니터링을 수행하였다(Lee *et al.*, 2014; Kim and Lee, 2019; Kim *et al.*, 2016; 2020). 2016년에는 기밀창호 설치 및 환경정비와 거동센서 재설비를 수행하여 내부 모니터링에 최적화된 시스템을 구축하였으며 현재까지 유지되고 있다(Lee *et al.*, 2021).

고분 내부에 대한 계측과 모니터링은 주로 정밀계측센서를 통해 이루어져 왔다. 이후 내부의 실제형상을 보다 정확하게 기록하기 위해 2010년과 2016년에 3차원 스캐닝이 진행되었으며 2019년에는 누수원인 규명과 함께 구

조해석 및 공간변화 분석 등 왕릉원의 전체적인 안정성 평가를 위해 3차원 공간정보를 구축하였다(Lee *et al.*, 2019; 2020).

2019년도 연구에서는 각 고분의 벽체 전체를 대상으로 상대적으로 넓은 범위의 변화를 관찰하였으며, 회벽이 탈락한 지점과 침하가 발생한 부재는 추가로 정밀 분석하였다. 형상정보를 활용한 가시화 및 분석은 미시적인 변화를 확인할 수 있는 좋은 방법이다. 그러나 초기의 변화는 거시적으로 나타나기보다는 국소적으로 발생하여 파악이 어려운 경우가 많기 때문에 모니터링 지점을 구체적으로 특정하여 변화양상을 검토할 필요가 있다.

Figure 2. Monitoring zones of murals in the tomb No. 6. (A to D) Mural walls in the east, west, south and north sides, respectively. (E) Cracks and break out area of bricks on the wall. (F) Magnified photograph of the boxed area in E.

따라서 이 연구에서는 무령왕릉과 왕릉원 고분군 내부의 취약지점을 선정하여 3차원 정밀스캐닝을 수행하였다. 이를 통해 고분 내부에서 발생하는 미세 변위를 가시화하고 거동의 진행성 여부를 명확하게 규명하기 위한 기초자료를 구축하였다. 이 형상정보를 근거로 동일 지점에 대한 연차별 모니터링을 통해 거동양상을 가시적으로 분석하여, 연구대상의 안정적인 보존을 위한 중요한 자료로 활용할 것이다.

2. 디지털 모니터링 및 연구방법

2.1. 모니터링 위치 선정

무령왕릉과 왕릉원은 외부환경에 직접적으로 노출됨에 따라 비교적 안정적으로 유지되던 내부의 평형상태가

교란되었으며, 이로 인해 복합적인 손상이 발생하였다. 또한 고분군 전반에 대한 재정비 이후 시간이 지나며 봉분 내부에 시공한 누수방지층의 내구성이 약화되었다(Lee *et al.*, 2019). 이 결과, 5호분에서는 강우가 직접적으로 고분 내부에 침투하여 이차적인 손상을 야기하였다(Figure 1A, 1B).

따라서 3차원 형상자료 취득에 앞서, 5호분에서 정밀모니터링이 필요한 취약한 지점을 파악하기 위해 정밀계측 및 영상자료를 분석하고, 고분 내부에서 대조를 통해 모니터링 지점을 선정하였다(Figure 1). 5호분에서는 벽체의 네 방위에서 탈락 가능성이 높은 회벽과(Figure 1A~D), 침하가 발생한 연도 인방석(Figure 1E, 1F)을 중심으로 모니터링하였다.

6호분의 내부는 5호분 및 무령왕릉과 달리 벽체의 네 면에 벽화가 있다. 그러나 이는 장기간 풍화과정을 겪으

Figure 3. Monitoring zones in the tomb of King Muryeong. (A) Protruding bricks showing the central roof in pathway. (B) Front arch of burial entrance. (C) Tilted and cracked bricks along the south wall.

며 이미 점착력과 내구성이 약화되었고, 내부의 노출과 동시에 급격한 환경변화에 따라 벽화의 바탕층과 안료층 곳곳에 균열과 갈라짐 및 탈락이 발생하는 큰 손상을 입었다(Figure 2).

따라서 이 연구에서는 네 방위 벽화의 표면에서 균열과 갈라짐이 두드러져 탈락위험이 높은 지점을 선정하여 3차원 스캐닝을 수행하였다(Figure 2A~D). 벽화 외에도 벽체를 구성하고 있는 벽돌에는 균열과 탈락이 현저한 곳이 산재한다. 이런 부위 중에서 특징적으로 손상도가 높은 부분을 3차원 정밀 모니터링 지점으로 설정하였다(Figure 2E, 2F).

무령왕릉에서는 부재의 하향이 관찰되는 연도 중앙 천장의 벽돌군과 현실과 연결되는 아치부분을 모니터링 대상으로 선정하였다(Figure 3A, 3B). 또한 벽체의 기울어짐과 균열이 나타난 벽체의 대표적 벽돌군에서도 3차원 형상정보를 취득하였다(Figure 3C).

2.2. 연구방법

이 연구에서는 왕릉원의 선행연구 자료를 검토하여 선정된 취약부를 대상으로 3차원 정밀스캐닝을 통해 형상분석을 위한 기초자료를 구축하였으며, 이를 정밀 계측자료와 비교하여 고분 내부의 변위를 가시적으로 분석하였다. 각 고분의 모니터링 지점에 대한 3차원 형상정보 취득은 Artec 3D사(LUX)의 Eva를 활용하였다.

이는 구조광 방식을 기본으로 연구대상을 스캔하며 0.4에서 1 m의 유효 스캔거리를 가지고 있다. 또한 최대 16초당 프레임 속도(fps)의 실시간 3차원 재구성 속도를 가지며, 3차원 점의 정확도는 0.1 mm이고 해상도는 0.2 mm의 분해능을 가지고 있다.

현장 스캔은 Artec Studio 9.3 소프트웨어를 활용하여 실시간으로 3차원 영상을 획득하였다. 이 프로그램은 스캔을 통해 생성한 이미지의 중첩위치를 자동으로 분석하

고 점을 기반으로 군집을 형성하여 폴리곤을 생성한다. 취득한 정보에 대한 정합과 병합 및 텍스처 매핑 같은 후처리는 동일 프로그램을 사용하였으며, 이 과정은 Jun *et al.*(2008) 및 Lee *et al.*(2012)의 연구를 참고하였다.

후처리 과정에 따라 완성한 폴리곤 메시는 Geomagic Design X 프로그램을 사용하여 편집하였으며 OBJ 확장자 형태로 저장하였다. 선행 데이터가 확보된 일부 형상정보는 평균제곱근(root mean square)을 산출하여 변위를 분석하였으며, 부재 간의 수직 및 수평거리를 비교하여 미세 거동을 가시화하였다.

3. 결과 및 해석

3.1. 형상정보 구축

연구대상의 3차원 형상정보 구축을 위해 고분 내부에서 획득한 스캔 데이터를 실내에서 일련의 후처리 공정을 통해 폴리곤 메시 모델로 완성하였다(Figure 4). 이 과정에서 스캔 데이터의 오차를 최소화하기 위해 초기에 개별 데이터에 대하여 수작업으로 공통지점을 설정하고 정합을 진행하였다. 이후 자동정합을 수행하여 최종적으로 3차원 형상모델을 생성하였다.

3차원 형상정보 구축과정에서 5호분은 특히 주의가 요구되었는데, 이는 5호분이 편마암 할석으로 축조된 굴식돌방무덤으로 벽체의 표면이 거칠고 부재 사이의 간격이 넓어 전반적으로 불규칙한 표면 상태를 가지고 있기 때문이다. 반면 비교적 규칙화된 벽돌로 축조되어 있는 6호분과 무령왕릉은 5호분에 비해 상대적으로 표면요철이 적어 원활한 스캔이 가능하였다. 그러나 벽돌에 새겨진 다양한 문양에 대해서는 정밀한 스캐닝과 세심한 보정이 필요하였다.

디지털 정밀모니터링을 위해 5호분에서는 탈락 위험이 높을 것으로 평가된 현실의 동서남북 방위에서 일부 회벽에 대한 형상정보를 구축하였다(Figure 5A~D). 또한

Figure 4. Partial images showing the post processing of 3D scan data for shape modeling. (A) Individual 3D scanning data. (B to D) Arrange, registration and merging processes for the 3D scan data, respectively.

Figure 5. Digital images showing the 3D scanning models of the tomb No. 5. (A to D) Plastered walls in the east, west, south and north sides, respectively. (E and F) Images of burial entrance and crack property on the lintel stone.

Figure 6. Digital images showing the 3D scanning models of the tomb No. 6. (A to D) Mural walls in the east, west, south and north sides, respectively. (E) Cracks and break out area of bricks on the wall. (F) Magnified image of the boxed area in E.

부재의 처짐과 균열이 발생한 연도 인방석(Figure 5E, 5F)도 모니터링 대상으로 선정하여 총 5지점의 형상정보를 모델링하였다.

6호분 내부에서도 훼손 가능성이 높게 평가된 지점에 대하여 각 벽면의 벽화를 중심으로 바탕층과 안료층의 균열 및 탈락이 두드러진 부분을 3차원 스캐닝하였다(Figure 6A~D). 벽화 외에 고분을 구성하는 벽돌군 중에서 균열과 깨짐 같은 물리적 손상이 상대적으로 많이 발생한 동측 벽체 상단에 대해서도 3차원 형상정보를 구축하였다(Figure 6E, 6F).

무령왕릉은 연도의 중앙 천장에서 하향이 발생한 벽돌

군과 함께 현실 입구와 맞닿아 있는 좌우측 아치구조의 벽돌을 모니터링 지점으로 선정하여 디지털 형상정보를 획득하였다(Figure 7A~D). 또한 균열과 변형이 발생한 서측 상부 벽체의 벽돌군(Figure 7E, 7F)에 대해서도 형상정보를 구축하였다.

이와 같이 고분군 내부의 취약부에 대한 3차원 형상정보의 해상도는 점의 개수와 평균 간격 및 데이터 크기로 세분하여 Table 1에 제시하였다. 이는 향후 동일 지점의 주기적인 디지털 모니터링을 위한 기초자료로서 매우 중요한 의미가 있다.

Figure 7. Digital images showing the 3D scanning models in the tomb of King Muryeong. (A) Shape image of dromos. (B) Vertical section of dromos. (C) Bricks arch of burial entrance. (D) Protruding bricks showing the central roof in the pathway. (E) Vertical section of protruding bricks. (F) Tilted and cracked bricks along the wall.

Table 1. Summary on results of 3D data analysis from the royal tomb of King Muryeong and the royal tombs in Gongju.

Tombs and locations			Number of points	Average point spacings (mm)	Data size (KB)
No. 5	Plastered wall	East	2,444,530	0.7399	636,234
		West	2,245,091	0.7343	576,947
		South	312,649	1.0737	76,457
		North	919,687	1.0606	229,987
	Lintel of entrance		4,266,355	1.1340	1,119,828
No. 6	Mural wall	East	4,419,411	0.7208	1,169,216
		West	2,154,580	0.7167	562,156
		South	4,234,390	0.514	1,122,089
		North	2,426,776	0.7257	636,036
	Bricks of east wall		4,113,625	0.7212	1,095,006
King Muryeong	Bricks of west wall		2,511,854	0.7158	660,214
	Dromos		26,732,923	1.0315	1,069,100

3.2. 변위분석

이 연구에서 3차원 형상정보를 통한 변위분석은 선행 연구가 수행된 5호분을 중심으로 이루어졌다. 회층의 탈락이 발생한 남측 벽에 대해 2010년과 2016년에 획득한 자료를 비교하였으며, 연도 인방석에서도 2016년 자료와 비교하여 처짐거동을 분석하였다. 6호분과 무령왕릉의 경우 형상정보 취득 지점에 대한 선행 연구가 없어 분석이 불가하였으나, 이 연구를 통해 향후 디지털 모니터링을 위한 기초자료가 구축되었다.

5호분의 회층 탈락부와 인방석의 처짐 부위에 대한 변위분석은 Figure 8에서 10에 제시하였다. 회벽의 경우, 두

개의 3차원 데이터를 동일하게 정렬시킨 뒤 기준이 되는 형상정보를 설정하고 두 데이터 간의 평균제곱근(root mean square, RMS)을 산출하였으며, 이를 가시화하여 편차를 분석하였다. 이는 (+) 또는 (-)의 수치로 나타나게 되며, 비교 대상과의 차이를 통해 추가적으로 발생한 박리, 박락 및 탈락과 같은 손상을 검출할 수 있다.

연도 인방석의 변화양상을 파악하기 위해 2019년도에 수행한 자료를 활용하였으며, 연도를 구성하는 부재 사이의 수평 및 수직 거리를 산출하여 두 자료를 취득한 기간 내에서 변위를 분석하였다. 2019년 모니터링 결과에 따르면, 남측 벽의 우측 하단에 대한 편차분석에서 너비 약 25

cm 정도의 회벽층 탈락이 확인되었으며, 이는 2010년에서 2016년도 사이에 탈락한 것으로 보고하였다(Lee *et al.*, 2019; 2021).

따라서 탈락이 발생한 동일 지점에 대한 디지털 모니터링을 위해 추가 스캔자료를 확보하여 형상정보를 구축하고 양자의 편차를 분석하였다(Figure 8B, 8C). 또한 색차를 이용해 데이터 간의 편차를 가시화하였다. 편차분석의 기준 값은 2019년도에 획득한 형상정보로 설정하였으며, 공차범위는 일차적으로 선행 연구와의 통일을 위해 ± 18 mm로 설정하였다(Figure 9A). 이후 탈락부에 대한 편차분석의 신뢰도를 높이기 위해 공차범위를 ± 2 mm로 좁혀 다시 한 번 분석을 수행하였다(Figure 9B).

이 결과, 공차범위를 ± 18 mm로 설정하였을 때 현저한 편차는 확인되지 않았다(Figure 9A). 또한 ± 2 mm로 대폭 좁혀 수행한 이차분석에서도 특별한 편차는 발견되지 않았다(Figure 9B). 이는 모니터링 기간 내에서 회벽 탈락부에 대한 추가적인 손상은 발생하지 않은 것을 지지하는 증거가 된다.

또한 5호분의 연도 인방석(Figure 10A)에 대한 변위 분석도 진행하였다. 분석을 위해 취득한 형상정보의 연도

부위에 수직 및 수평 방향으로 각각 10지점을 선정하여 부재 사이의 직선거리를 산출하였다(Figure 10B, 10C).

이 결과, 연도 바닥과 인방석 사이의 수직거리는 최소 0.09 mm에서 최대 0.81 mm(평균 0.32 mm)만큼의 처짐 변위가 발생한 것으로 확인되었다. 연도 인방석을 지지하고 있는 두 벽체 사이의 수평거리는 최소 0.08 mm에서 최대 0.96 mm(평균 0.36 mm)의 수치를 보이며 두 벽체 간 거리가 증가한 것으로 나타났다(Table 2).

3.3. 거동특성 분석

5호분의 변위분석 결과를 토대로 회벽 탈락부와 연도 인방석의 미세한 거동특성을 검토하였다. 남측 회벽 탈락부는 약 25 cm의 비교적 큰 면적에서 탈락이 발생하여 계속적인 손상 위험이 높은 곳이다. 따라서 추가적인 손상과 진행성 여부를 검토하기 위해 2019년과 2021년 사이 2년간의 변화양상을 분석하였다.

그러나 동일한 공차범위 ± 18 mm를 기준으로 변위를 평가했을 때, 더 이상의 손상은 발견되지 않았다. 이는 실제 발생 가능한 손상의 크기보다 손상정도를 판별할 수

Figure 8. Photograph and digital images showing the 3D scanning models of plastered south wall in the tomb No. 5. (A) Plastered wall in the south. (B) 3D data acquired in 2019. (C) 3D data acquired in 2021.

Figure 9. Digital images of deviation analysis showing the zone of Figure 8 in the tomb No. 5. (A, B) Tolerance range on the ± 18 mm and ± 2 mm, respectively.

Table 2. Results of vertical and horizontal distance measurements (mm) in entrance area from the tomb No. 5. Point numbers are the same as in those of Figure 10B and 10C.

Vertical directions				Horizontal directions			
Points	2019	2021	Distance	Points	2019	2021	Distance
H1	1,143.25	1,142.61	-0.64	W1	1,265.64	1,266.22	0.58
H2	1,190.31	1,189.64	-0.67	W2	1,257.71	1,258.67	0.96
H3	1,012.88	1,012.78	-0.10	W3	1,264.56	1,265.02	0.46
H4	1,052.66	1,051.85	-0.81	W4	1,305.80	1,305.68	0.12
H5	994.21	994.10	-0.11	W5	1,205.45	1,205.69	0.24
H6	1,071.25	1,071.16	-0.09	W6	1,253.19	1,253.45	0.26
H7	1,111.20	1,110.97	-0.23	W7	1,296.85	1,297.11	0.26
H8	1,081.78	1,081.60	-0.18	W8	1,290.85	1,291.10	0.25
H9	1,214.02	1,213.78	-0.24	W9	1,314.46	1,314.87	0.41
H10	1,153.33	1,153.17	-0.16	W10	1,112.94	1,113.02	0.08
Mean	1,102.49	1,102.17	-0.32	Mean	1,256.74	1,257.08	0.36

Figure 10. Photograph and digital images showing the measurement points for vertical and horizontal distances in entrance lintel stone of tomb No. 5. (A) Front view of burial entrance lintel stone reinforced with supports. (B, C) Vertical and horizontal distance measurement points for 3D data acquired in 2021.

있는 공차범위가 더 크게 설정되어 나타난 현상으로 판단하여, 보다 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해 공차범위를 ± 2 mm로 축소하여 추가 분석을 진행하였다.

이 결과에서도 가시적인 변위는 확인되지 않는 것으로 보아 남측 회벽에서는 2019년에서 2021년 사이에 추가적인 박락이나 탈락은 발생하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 남측 회벽은 대형 탈락의 전력이 있으며, 탈락부위 주변은 이미 상당히 약화된 상태이다. 현재까지 추가 손상은 없지만 이 부분에 대한 연속적인 모니터링의 필요성은 충분하다.

연도 인방석에 대한 거동분석 결과, 최근 2년 동안 미세한 침하가 진행된 것을 보여준다. 인방석이 처짐거동하는 동안 인방석을 지지하는 벽체는 상부의 하중에 의해 고분 바깥쪽으로 미세하게 팽창한 것으로 나타났으며, 현재도 진행 중임을 보여준다(Figure 11). 이 거동양상은

2019년의 모니터링에서 2016년 형상정보와 비교를 통해 밝혀진 결과와 매우 유사하다.

당시 인방석은 수직으로 평균 0.97 mm만큼 처짐 거동하였고, 연도의 벽체는 바깥쪽으로 평균 1.19 mm만큼 수평 이동하였다(Lee *et al.*, 2019; 2021). 이는 3년 동안 취득한 값으로, 1년 평균 거동량으로 환산하면 수직거리리는 약 0.32 mm로, 수평거리리는 약 0.40 mm만큼의 거동이 발생한 것으로 판단할 수 있다. 이렇게 산출된 값은 이 연구에서 나타난 수직거리 평균 0.32 mm 및 수평거리 평균 0.36 mm와 거의 동일하다. 따라서 5호분 인방석이 매년 일정한 양만큼 거동하고 있음을 지시하는 것이다.

이와 같이 인방석의 거동특성은 3차원 스캐닝을 통한 편차분석 외에도 5호분 연도부 내에 설치되어 있는 처짐 변위계에서도 확인되었다(Figure 11). 이 연구기간에 정밀 계측센서에서 이전에 발생하였던 단기간 내의 급격한 처

Figure 11. Photograph and diagram showing the sagging displacements on position transducer of lintel stone in the tomb No. 5. (A) Position transducer attached to the lintel stone. (B) Measurement results from April in 2016 to February in 2021.

침은 발견되지 않았으나, 시간의 흐름에 따라 연속적으로 침하가 발생하는 거동양상을 보였다.

이를 통해 3차원 형상정보를 활용한 편차분석이 실제 처짐 변위계에서도 동일한 경향성을 가지며 기록되었음을 확인하였다(Figure 11). 이 두 가지 방법은 서로 상호보완적인 관계로 5호분 연도 인방석뿐만 아니라 조적식 문화유산의 미세한 거동양상을 파악하는 데 유용하게 활용할 수 있는 정보를 제공하였다.

4. 보존과학적 고찰

이 연구에서는 공주 무령왕릉과 왕릉원의 고분 내부에 존재하는 미시적 손상의 진행양상을 가시적으로 기록하기 위해 각 고분별로 정밀 모니터링 지점을 다양하게 선정하여 3차원 형상정보를 구축하였다. 특히 5호분에서 획득한 형상정보를 선행 연구와 비교하여 편차와 변위 및 거동변화를 입증하였다.

5호분은 공주 왕릉원에서 손상도가 가장 높은 고분이며, 이 중에서도 연도 인방석과 남측 회벽의 변형이 심하고 위험도가 높아 지속적인 모니터링이 필요한 구간이다. 최근 2년간 회벽 탈락부의 추가 손상은 발견되지 않았으나 인방석은 지속적으로 침하와 팽창이 나타나고 있다. 이는 현실의 누수가 영향을 준 것으로 집중적인 관리가 요구된다.

6호분과 내부의 벽화는 발굴 이후 손상이 계속되어 왔으나 이에 대한 변화양상을 명확하게 보고한 연구는 없다. 또한 현실 벽체에 대한 변위분석이 수행되었으나(Kim *et al.*, 2020), 취약부에 대한 정밀 모니터링은 없었다. 이 연구를 통해 각 방위의 벽화와 손상이 발생한 벽체의 벽돌을 중심으로 3차원 형상정보를 구축하였으며, 이를 활용하여 향후 변화양상을 가시적으로 검토할 수 있다.

무령왕릉은 전체적인 안전에 심각한 문제가 발생하여 구조적 안정성 향상을 위한 정밀진단과 벽체의 거동변화 및 누수에 따른 수위변화 모델링 등 보존관리를 위한 적극적인 연구와 이를 반영한 정비가 수행된 바 있다(Koo and Suh, 1999; Suh *et al.*, 1997; 1998; Suh and Park, 1997). 그러나 구조적 취약부에 대한 디지털 모니터링은 검토된 바 없어 지속적인 감시와 변위를 분석하기 위한 3차원 형상정보를 구축하였으며, 이는 향후 무령왕릉의 미세한 변화양상 추적에 중요한 자료가 될 것이다.

현재 5호분 내부는 직접적인 누수가 발생하여 서측 및 북측 벽에는 우수로 인한 배부름이 심하고 물리적 변형과 회벽의 탈락 위험이 상존하며 인방석에서는 처짐 변형이 나타난다. 이 인방석은 구조적 불안정성에 따라 전단파괴와 침하가 모두 발생한 상태로서, 변형에 대한 형상정보와 거동이 일치함을 입증하였다. 이는 성벽과 같은 조적식 문화유산의 정밀 모니터링과 거동분석에 효과적으로 적용된 신뢰도 높은 방법이다(Park *et al.*, 2021).

한편 회벽은 물에 젖어 용해되고 팽창과 수축이 주기적으로 발생하고 있어 손상은 계속 가증될 것이다. 현재 연도의 인방석에는 하중의 분산과 구조적 보강을 위해 티타늄 지지대 2개와 철제 지지대 1개를 설치하여 상부의 압력을 제어하고 있다. 따라서 5호분은 연속적인 정밀 모니터링 및 평가를 통해 안정적 보존관리와 감시체계가 가동되어야 할 것이다.

5. 결 언

1. 공주 무령왕릉과 왕릉원은 웅진백제시대 왕족과 귀족들의 무덤군이다. 이들은 발굴 이후 내부가 공개됨에 따라 급격한 손상을 입었으며, 이를 제어하기 위한 다양한 방안이 적용되어 왔다. 이 연구에서는 왕릉원의 5호분,

6호분 및 무령왕릉 내부에 발생한 손상부를 가시화하고 디지털 모니터링을 위해 고분별 취약부를 선정하여 3차원 형상정보를 구축하였다.

2. 특히 5호분에서는 네 방위의 회벽에서 탈락 위험이 높은 지점과 처짐 거동이 발생하는 인방석을 선정하였으며, 6호분에서는 각 방위의 벽화 및 균열과 탈락이 일어난 벽체 일부를, 무령왕릉에서는 연도 천장 중앙의 하향 벽돌군과 아치를 구성하는 부재 및 벽체의 기울어짐과 균열이 두드러진 부분을 모니터링 대상으로 선정하였다.

3. 모니터링 지점에 대한 스캔은 정확도, 정밀도 및 점밀도를 고려하여 정밀 스캐너를 사용하였으며, 3차원 수치자료 취득 이후 정합 및 병합 등 후처리 과정을 거쳐 3차원 형상모델을 생성하였다. 5호분은 다른 고분과 달리 할석을 사용하여 부재 사이가 멀고 표면에 요철이 많아 다양한 기법을 적용하였다.

4. 변위분석은 5호분 남측 회벽과 연도 인방석에서 이루어졌다. 회벽의 탈락부에 대해서는 평균제곱근을 적용하여 편차분석을 수행하였으며, 인방석은 수직 및 수평 거리를 계산하여 변화량을 측정하였다. 회벽 탈락부의 편차는 공차범위를 ± 18 mm와 ± 2 mm로 설정했을 때 모두 추가 손상은 발견되지 않았으나, 인방석의 수직 및 수평 변위는 평균 0.32 mm와 평균 0.36 mm의 처짐이 발생한 것으로 나타났다.

5. 직접적인 누수가 발생한 5호분 내부는 특히 서측과 북측 벽체에서 현저한 변형이 나타난다. 따라서 남측 회벽은 다른 방위에 비해 누수의 영향을 상대적으로 덜 받았을 가능성이 있다. 고분의 전반적인 안정성을 평가하기 위해서는 다른 방위의 정밀 모니터링도 요구되며, 연도 인방석의 지지대는 구조적 안정성을 확보하기 위해 보강이 필요한 것으로 나타났다.

6. 이 연구에서 구축한 공주 무령왕릉과 왕릉원 고분군 내부의 취약지점에 대한 3차원 형상정보는 향후 계속적인 정밀 모니터링을 통해 미세 변위와 거동 등 디지털 기록의 가시화를 위해 아주 중요한 자료가 될 것이다. 이는 고분군의 장기적 안정성 평가와 유지관리의 기초자료로 유용하게 활용될 것이다.

사 사

이 연구는 충청남도 공주시의 2020년 ‘공주 송산리고분군 내부 모니터링 및 분석’의 일환으로 수행된 결과임을 명기하며, 공주시의 행정정책 지원에 감사한다.

REFERENCES

- Jun, B.K., Lee, C.H. and Suh, M., 2008, Stability evaluation of multi-storied stone pagoda in the Daewonsa temple using three-dimensional image analysis. *Journal of Conservation Science*, 22, 31-42. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.W., Jeong, S.H., Lee, M.Y. and Chung, Y.J., 2016, Thermal environment analysis for preserving ancient mural painting in Songsan-ri tomb No. 6, Gongju, Korea. *Journal of Conservation Science*, 32(4), 521-534. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.H. and Lee, C.H., 2019, Interpretation on internal microclimatic characteristics and thermal environment stability of the royal tombs at Songsanri in Gongju, Korea. *Journal of Conservation Science*, 35(2), 99-115. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.H., Lee C.H. and Jo, Y.H., 2020, Behavioral characteristics and structural stability of the walls in the ancient Korean royal tombs from the sixth century Baekje kingdom. *Environmental Earth Sciences*, 79(3), 1-13.
- Koo, M.H. and Suh, M., 1999, An artificial recharge test and its numerical simulation for the analysis of seepage in the Songsanri tomb site of Kongju. *The Journal of Engineering Geology*, 9(1), 1-15. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Chung, Y.J., Han, K.S., Yeo, M.S., Lee, J.Y. and Yang, Y.S., 2014, Research and development of eco-friendly air conditioning system for royal tombs at Songsanri, Gongju. *Research Report of Gongju City*, 1-387. (in Korean)
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Kim, S.D., 2012, Three-dimensional image analysis, deterioration evaluation and scientific conservation treatment of the Daechiri dinosaur track ways in Haman county, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 48(2), 179-191. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Jo, Y.H., Shin, D.B., Ha, S.H., Lee, S.C., Lee, G.H. and Lee, S.M., 2019, A study of stability evaluation in the royal tombs in Songsan-ri, Gongju. *Research Report of Gongju City*, 1-253. (in Korean)
- Lee, C.H., Yang, H.R., Choi, I.K., Lee, G.S., Lee, J.E., Lee, H.J. and Chae, J., 2021, A internal monitoring and analysis of the royal tombs in Songsan-ri, Gongju. *Research Report of Gongju City*, 1-222. (in Korean)
- Lee, G.Y., Jo, Y.H., Lee, S.M., Lee, C.H. and Lee, K., 2020, Structural safety evaluation of tomb of King Muryeong in tumulis of Songsan-ri through finite element analysis. *Journal of Korean Association for*

- Spatial Structures, 20(3), 63-70. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., Park, S.T. and Lee, C.H., 2021, Structural stability and microscale behaviors of the fortress wall from the sixth century Baekje kingdom in ancient Korea. Heritage Science, 9(1), 1-16.
- Suh, M. and Park, E.J., 1997, Characteristics of subsurface movement and safety of the Songsanri tomb site of the Baekje dynasty using tiltmeter system. The Journal of Engineering Geology, 7(3), 191-205. (in Korean with English abstract)
- Suh, M., 1999, Geotechnical consideration on the conservation of the Muryong royal tomb. Journal of Conservation Science, 8(1), 40-50. (in Korean with English abstract)
- Suh, M., Lee, C.H., Jeong, G.O. and Kim, D.H., 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)
- Suh, M., Lee, N.S., Choi, S.W., Kim, G.H., Jeong, S.M. and Lee, G.B., 1998, In-situ status and conservational strategy of the Muryong royal tomb, the Songsanri tomb No. 5 and the Songsanri tomb No. 6 of Baekje dynasty. The Journal of Natural Science, Kongju National University, 7, 147-161. (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)