

무령왕릉의 보존을 위한 지반공학적 고찰

서만철

공주대학교 지질환경과학과, 충남 공주시 신관동 182,

Geotechnical Consideration on the Conservation of the Muryong Royal Tomb

Mancheol Suh

Dept. of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju, Chungnam 314-701, KOREA

초록 백제시대의 대표적 문화유적인 무령왕릉의 보존대책을 제시하기 위한 벽체 거동 관측, 지하수관측, 비파괴 물리탐사 등의 지반공학적 연구를 실시하였다. 무령왕릉의 구조거동은 전체적으로 전실쪽인 남쪽방향으로 일어나며 동측 벽 및 서측 벽은 바깥쪽으로 미약한 거동을 보여 구조안전에 문제가 있는 것으로 판단된다. 왕릉의 구조거동은 우기에는 그 변위가 전기의 약 2배에 달하는 것으로 판단되어 지반이 침투수에 노출되는 우기에는 고분의 구조안전에 심각한 문제가 있는 것으로 판단되며, 또한 무령왕릉의 벽체 거동의 현저한 반응은 왕릉내부의 온도변화와 강수에 기인되는 것으로 판단된다. 그러므로 왕릉 부지내로의 침투수를 방지하여야 하며 또한 고분내부를 항온 상태를 유지할 필요가 있다. 주된 강우의 침투경로는 왕릉상부의 누수방지용 강회다짐의 균열현상 때문으로 확인되므로 효과적인 누수 방지층의 보강이 시급한 것으로 판단된다. 무령왕릉 상부의 누수방지층에서 발견되는 다수의 균열은 주로 북서쪽과 남동쪽에 집중되어 일정방향의 장력의 존재를 지지하며, 이는 무령왕릉의 벽체거동 방향과 일치하고 있다. 이러한 사실은 구조 변형에 대한 대책이 없는 한, 새로운 시공을 하여도 균열이 재발될 것을 예측케한다. 무령왕릉의 보존을 위한 보수대책은 남쪽 방향으로의 벽체 거동을 저지하는 구조안전대책과 누수방지대책이 가장 중요하다. 그러므로, 무령왕릉의 관람용 전실을 원래대로 복구하여 구조변형 요인을 제거한 후 누수방지층의 보강공사가 필요하다.

ABSTRACT A geotechnical research including observation of the movement of wall-structure, monitoring of groundwater, non-destructive geophysical investigation was conducted to workout a countermeasure to conserve the Muryong Royal Tomb which is the most extinguishable cultural property of the Baekje dynasty. Movement of the structure of Muryong Royal Tomb generally arises to the front chamber and its amplitude in a rainy season is twice of that in the dry season. It represents serious problem concerned about structural safety of the royal tomb in the rainy season. Movement of wall-structure is caused due to the rain infiltration through cracks in the quicklime layer within the soil mound on the top of the royal tomb and the change of the temperature inside of the tomb. Cracks found around the Muryong Royal Tomb are mostly spread in NW and SE of the tomb structure and it harmonizes with the direction of movement of wall-structure of the Muryong Royal Tomb. Counter-plans for safety and prevention of water-leakage that obstruct the movement of wall structures towards the direction

of south are very important for the conservation of Muryong Royal Tomb. After getting rid of the cause of structural change by the restoration of the front chamber of the Muryong Royal Tomb, it needs to reinforce the quicklime layer for prevention of waterleak.

1. 서론

무령왕릉(武寧王陵)은 백제 25대 무령왕과 왕비를 합장한 능으로서 그 출토유물들이 삼국사기 및

동국여지승람의 사료를 확인시킨 유일성과 부장품의 예술성에 있어서 국가적으로 매우 중요한 문화 유적이다. 무령왕릉은 현재 송산리 1~6 호분과 함께 충남 공주시 금성동에 소재한다(Fig. 1).

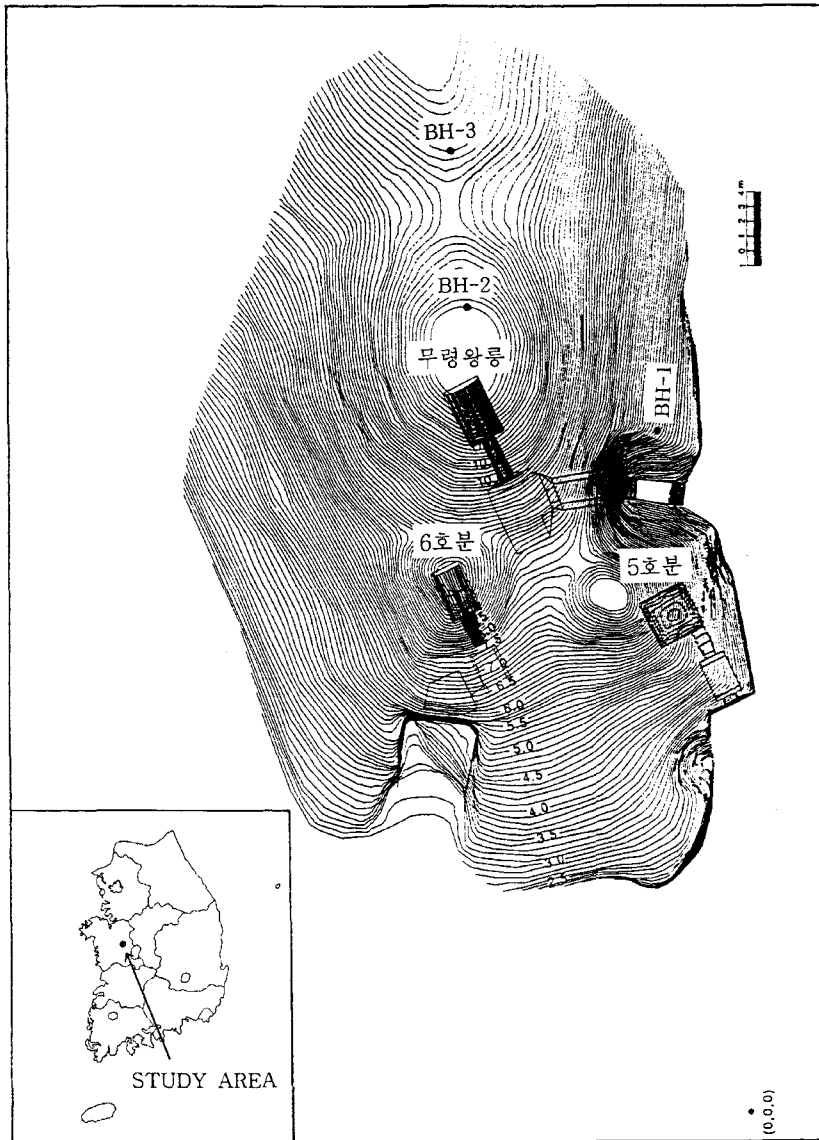


Fig. 1. Location map of the Muryong Royal Tomb with topography of the Songsanri tomb site. Three boreholes are located around the tomb.

무령왕릉에 대한 보존측면에서의 연구는 1971년 왕릉의 발굴후 발간된 무령왕릉발굴보고서와¹ 윤무병에 의한 연구² 등을 들 수 있으며, 수차례의 보수를 거쳐왔다.³ 무령왕릉을 포함한 송산리고분군에 대한 보수는 1986년부터 1994년까지 7회 이루어진 것으로 기록되어 있다. 이 중 대부분은 전기공사, 조정, 진입로 또는 관리사무소 등의 시설에 관한 보수이며, 1990년 고분의 누수방지를 위한 봉분강화다짐층을 시공한 바 있다.

1995년 여름의 공주지방에 내린 심한 강우현상으로 인하여 무령왕릉의 연도천정부 등에서 누수현상이 있었으며 그해 겨울에는 무령왕릉 연도 천정부의 벽돌 3개가 하향 이동하는 등의 왕릉의 구조 안전에 관한 심각성을 인식하게 되었다.⁴ 벽돌 3개의 하향이동은 발굴당시부터 발견된 현상이었으나¹ 관리목적상 상부로 밀어넣어 놓았던 것이었다.⁵ 그에 따라 무령왕릉을 포함한 송산리고분군에 대한 종합 정밀조사의 필요성이 제기되었다.

유적을 안전하게 보존하기 위해서는 과학적인 방법을 통한 계측과 그 분석결과에 따라 보존대책을 마련할 필요가 있다. 특히, 무령왕릉과 같이 지반내부에 있는 문화유적의 보수를 위한 대책을 마련하기 위해서는 우선 현재의 지반상황에 대한 정확한 계측 자료에 바탕을 두고 실시되어야 한다. 본 연구는 보존상 심각한 문제점이 인식된 무령왕릉을 비롯한 송산리고분군의 과학적 보존방향을 제시할 목적으로 1996-1997년 사이에 이루어지게 되었으며, 누수현상 및 원인 규명,⁶ 고분구조의 벽체거동 상황 및 구조안전 점검,⁷⁻⁹ 비파괴 물리탐사 등의 지반공학적 연구를^{10,11} 비롯한 종합적 연구가 이루어졌다.

2. 고분벽체의 거동 계측

2.1. 계측방법

무령왕릉의 벽체경사변화를 장기관측하는데 이용된 장비는 경사변화계측기(tiltmeter), 모뎀 및 PC 등 3개의 부분으로 이루어지며, 경사변화계측기는 미국의 AGI(Applied Geomechanics Inc.)사의 모델로써, 지구의 중력방향을 기준으로 2-축 틸트센서를 왕릉내부 4곳에 설치하여 계측하였다(Fig. 2). 고분벽체에 설치된 4개의 기울기 센서로부터

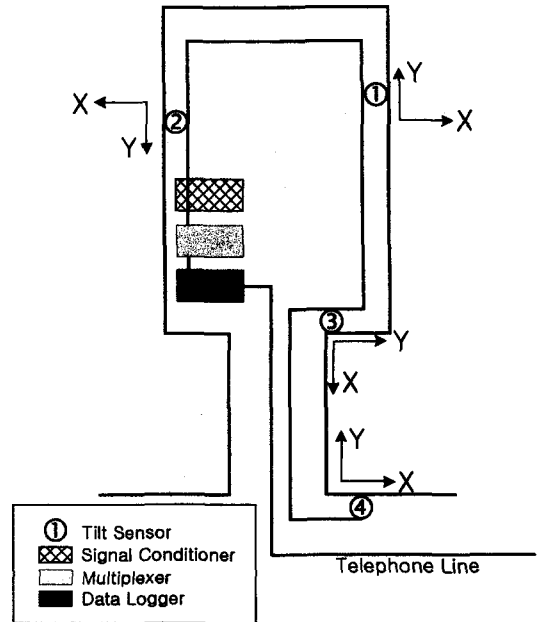


Fig. 2. Distribution of tilt sensors and their measurement directions.

매 15분마다 미약하게 출력되는 전압을 2대의 Signal Conditioner를 통하여 증폭시켜 Data Logger에 경사변화 데이터를 기록하고 전화선을 통하여 연구실의 자료처리용 컴퓨터와 연결하여 자료처리를 하였다. 지반의 틸트는 대기의 온도 및 압력, 강우 및 지하수위의 변화등에 많은 영향을 받으므로 무령왕릉의 벽체경사변화계측시 온도, 강우, 지하수위의 변화 등을 함께 실시하였다. 고분벽체의 거동은 벽체의 전후방향과 벽체의 전단방향의 변위가 측정되었다. Fig. 3은 관측기간 전 기간 동안의 무령왕릉 연도 입구벽에 설치된 4번 센서의 벽체경사변화계측 자료를 연속적으로 나타낸 것이다.

2.2. 무령왕릉 벽체의 전반적 거동상태

무령왕릉에 설치된 4개의 기울기 센서중 센서 1, 2, 3은 1996년 7월 14일부터 측정을 하였으며 센서 4는 추가로 설치되어 1997년 2월 14일부터 측정을 시작하였다. 그러나 센서의 접착제가 응고되는데 시간이 필요하여 1996년 8월 3일 이후는 접착제가 완전히 응고되어 센서와 벽체가 함께 거동한 것으로 판단된다. 계측기간동안 왕릉의 동측

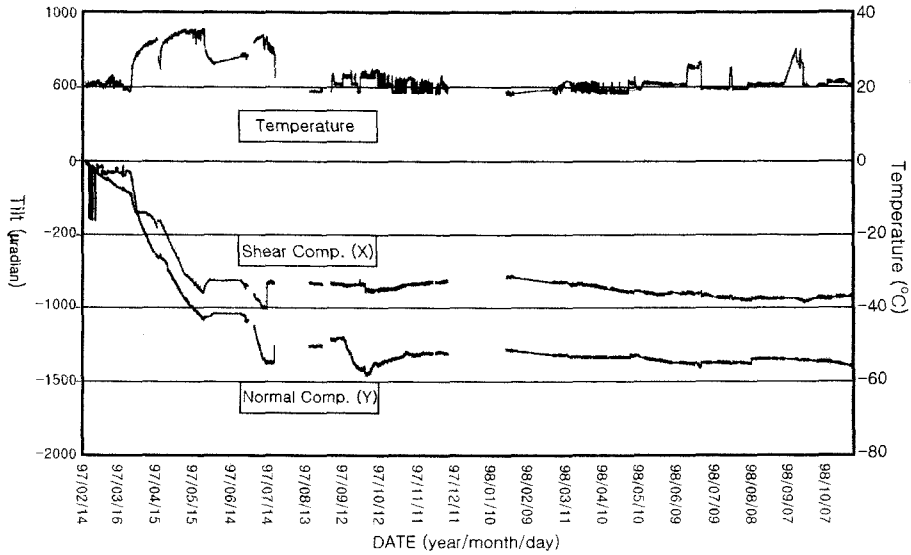


Fig. 3. Tilt monitoring on sensor 4 installed on south of the passage way to the inner hall of the tomb.

Table 1. Result of wall movement of the Muryong Royal Tomb for one year from October 1, 1996 to September 30, 1997 (unit: μ radian, $1^\circ = 17453 \mu$ radians). Negative value means inward movement and positive value means outward movement.

Sensor No.	wall side	Normal Component	Shear Component	Total Tilt	Direction
sensor 1	east	814.13	-525.48	968.99	SE
sensor 2	west	660.83	151.10	677.88	SW
sensor 3	south	1421.54	2099.24	2535.27	SE
sensor 4	south	-1442.6	-877.92	1688.74	SW

벽에 설치된 센서 1에 의한 변위는 남동방향으로 968.99 μ radian, 서측벽에 설치된 센서 2는 남서방향으로 677.88 μ radian, 현실 남측벽에 설치된 센서 3은 남동방향으로 2535.27 μ radian, 연도입구의 남측벽에 설치된 센서 4는 남서방향으로 1688.74 μ radian의 변위를 기록하였다(Table 1). 왕릉의 현실 남측벽에 설치된 센서 3이 가장 큰 변위를 보이는데, 이는 센서가 부착된 벽돌이 견고한 상태가 아님을 추후에 파악하게 되었다. 무령왕릉의 안전도 측면에서 연도입구 남측벽에 설치된 센서 4의 계측치가 중요한 역할을 하고 있는데, 센서 4의 직각성분이 지속적으로 남측으로 변위를 일으키고 있는 사실이 확인되었다(Fig. 4). 4개의 센서가 공통적으로 남쪽 방향성분의 거동을 보이고

있는데, 이러한 현상은 계측결과가 비록 벽돌 개개의 움직임은 기록하였다 할지라도 구조전체의 남쪽으로의 거동이라고 판단하여도 무방할 것이다. 그리고 동측벽과 서측벽, 그리고 남측벽 모두가 왕릉의 바깥쪽으로의 거동을 보여 구조안전에 문제가 있음을 나타내고 있다.

Fig. 5의 서측벽의 벽돌깨짐을 살펴보면 전단변위가 남쪽으로 거동을 한다는 것은 확실히 입증할 수 있다. 1972년 현장에서 작성된 고분 내부도면에 의하면, ①~⑤벽돌이 상하부 수평으로 놓인 벽돌과 대체적으로 직각으로 위치하고 있다.² 그러나 동일 부위에 대한 1997년 촬영된 사진(Fig. 5b)을 보면, 해당 벽돌들이 남쪽으로 기울어 있는 현상을 보이고 있다. 이는 1971년 발굴 이후 현재

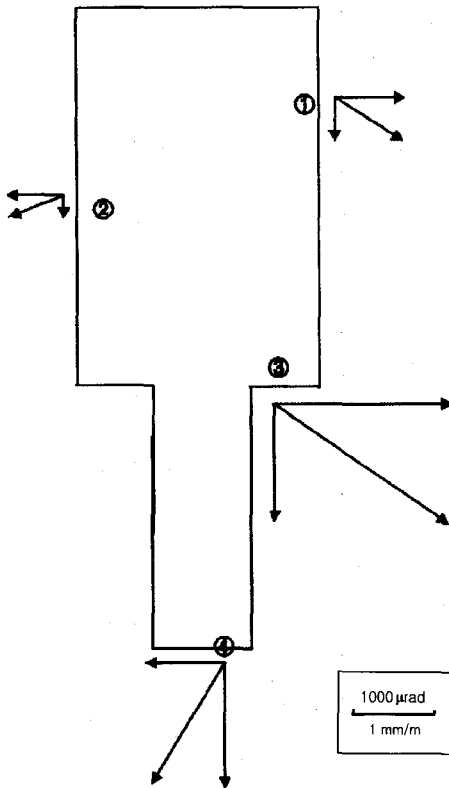


Fig. 4. Total tilting vector for one year from October 1, 1996 to September 30, 1997.

까지 서서히 진행된 변형으로써 현실 서측벽에 설치된 센서 2의 계측결과와 일치하고 있다.

2.3. 강우 현상과 벽체 거동

벽체거동 자료와 일별 강수량 자료를 비교해 보면 관측 기간 중에 나타나는 대·소의 변형 현상은 대부분 강우와 관련되어 있음을 알 수 있다. 관측기간 중에, 관측지점에서 몇몇 의미있는 사건이 발생하였는 바, 97년 7월 1일부터 7일까지(a), 7월 11일부터 16일까지(b), 8월 1일부터 11일까지(c) 그리고 8월 20일부터 26일까지의(d, 전형적인 맑은 날씨) 현상들을 분석하였다(Table 2). 기간 a, b, c 는 동기간 중 각각 302, 110 및 234 mm 등 비교적 많은 비가 온 기간이었고, 기간 d는 전형적인 맑은 날씨였다. 이때 무령왕릉 내의 각 센서들의 틸트변화량을 표로 나타내면 Table 2와 같다.

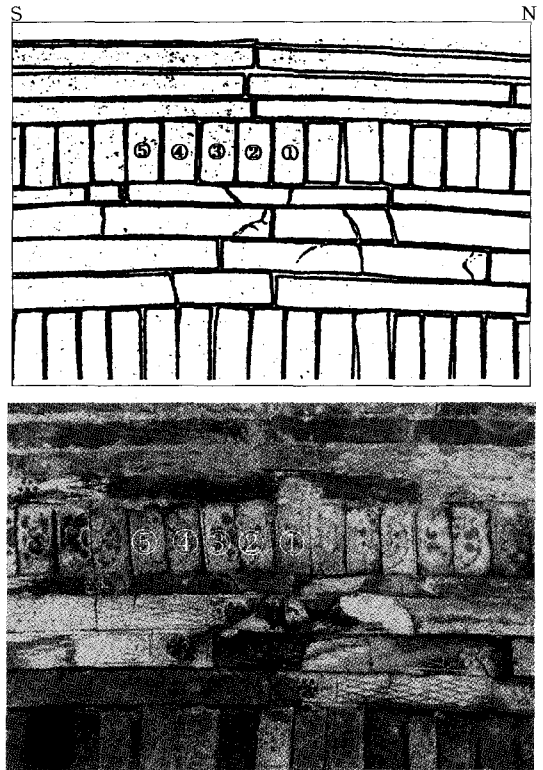


Fig. 5. Drawing of bricks above the southern fire place in the western wall of the Muryong Royal Tomb (drawn in 1972), and the Photo of the same bricks mentioned above taken in 1997. Numbered bricks are leaned toward south in the photo.

그리고 관측기간중 시추공으로부터 고분내의 지하수위를 측정하였는데 Fig. 6 에 제시되어 있다. 비가 많이 내린 기간의 지하수위를 보면, 예를 들어 무령왕릉 입구에 위치한 1호공으로부터의 지하수위 측정결과를 보면 지표로부터 6.5~7.5 m, 무령왕릉 현실 바닥으로부터 5.7~6.7 m 하부에 지하수위가 위치하고 있다. 그러나, 무령왕릉 북측에 위치한 시추공 2호공의 경우 집중호우시 지하수위가 무령왕릉 현실 바닥보다 30~40 cm 높게 유지되어 왕릉 주위의 지반을 포화시키는 것으로 관측되었다. 또한 봉분내부의 토양층구조에 대한 GPR (Ground Penetration Radar) 영상단면을 분석한 결과 5호분 상부와 무령왕릉 연도상부의 누수방지층이 심하게 균열되어 있음을 발견하였다.³ 이 두 곳은 고분내부로 직접누수가 발생하는 곳이다. 비

Table 2. Tilt data for periods of different weather conditions

Sensor & Direction	Period	Deformation			Direction	Remarks	
		μ rad	mm/m	per year			
Sensor 1	X	97.7.1 - 97.7.7	205	0.205	10.7	+	Normal(EW)
		97.7.11 - 97.7.16	132	0.132	8.03	+	
		97.8.1 - 97.8.11	71	0.071	2.4	-	
	Y	97.8.20 - 97.8.26	2	0.002	0.1	+	Shear(NS)
		97.7.1 - 97.7.7	79	0.079	4.12	-	
		97.7.11 - 97.7.16	3	0.003	0.2	-	
		97.8.1 - 97.8.11	19	0.019	0.63	+	
97.8.20 - 97.8.26	4	0.004	0.21	+			
Sensor 2	X	97.7.1 - 97.7.7	201	0.201	10.5	+	Normal(EW)
		97.7.11 - 97.7.16	149	0.149	9.1	+	
		97.8.1 - 97.8.11	132	0.132	4.4	-	
	Y	97.8.20 - 97.8.26	51	0.051	2.7	-	Shear(NS)
		97.7.1 - 97.7.7	118	0.118	6.2	-	
		97.7.11 - 97.7.16	22	0.022	1.4	+	
		97.8.1 - 97.8.11	20	0.020	0.66	+	
97.8.20 - 97.8.26	10	0.01	0.5	+			
Sensor 3	X	97.7.1 - 97.7.7	249	0.249	13	-	Normal(NS)
		97.7.11 - 97.7.16	2	0.002	0.1	+	
		97.8.1 - 97.8.11	177	0.177	5.9	+	
	Y	97.8.20 - 97.8.26	62	0.062	3.2	+	Shear(EW)
		97.7.1 - 97.7.7	5	0.005	0.3	-	
		97.7.11 - 97.7.16	83	0.083	5.1	+	
		97.8.1 - 97.8.11	93	0.093	3.1	+	
97.8.20 - 97.8.26	32	0.032	1.7	+			
Sensor 4	X	97.7.1 - 97.7.7	199	0.199	10.4	-	Shear(EW)
		97.7.11 - 97.7.16	42	0.042	2.6	+	
		97.8.20 - 97.8.26	7	0.007	0.4	-	
	Y	97.7.1 - 97.7.7	70	0.07	3.7	-	Normal(NS)
		97.7.11 - 97.7.16	181	0.181	11	-	
97.8.20 - 97.8.26	2	0.002	0.1	+			

※ - : tilting inward (normal), + : tilting outward (normal),
 $1^\circ = 17453 \mu\text{radians}$,

교적 비가 많이 내리는 기간에 직접누수와 지하수 형태로 유입된 침투수는 고분군 주위의 지반의 함수비를 증가시켜 지반의 지지력을 약화시키고 또한 고분내로 서서히 유입되어 고분내부의 습도를 100%로 유지시키는 주된 원인이다. 지하로 스며든 빗물은 Pore pressure를 증가시켜 토양층을 상부로 확장(expansion)시킬 것이다. 그리고, 시추자료의 화학성분 분석결과 지반에 Smecite 광물이 다량 발견되는 바, 빗물유입으로 인하여 Smecite 광

물의 부피팽창으로 인하여 지반이 약화될 가능성이 매우 높다.

이처럼 기상조건이 다른 주간 틸트거동을 비교해 보면 강우량이 많은 기간의 틸트거동이 전형적인 맑은 날씨가 계속된 기간보다 최대 5배 정도까지 큰 것을 볼 수 있다.

우기를 지나 지반이 지하수로 충전된 8월과 건기를 지난 2-3월의 벽체거동 수치를 비교하면 지반이 지하수로 충전된 8-9월의 거동치가 2-3월의

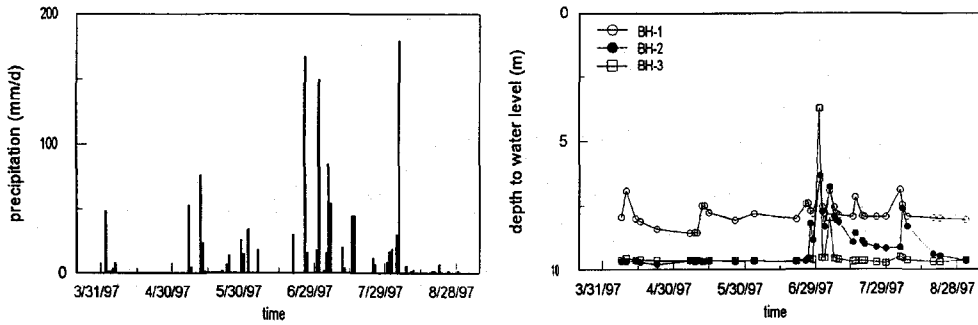


Fig. 6. Precipitation(up) and groundwater level in boreholes(low). Depths were measured from the surface of each well.

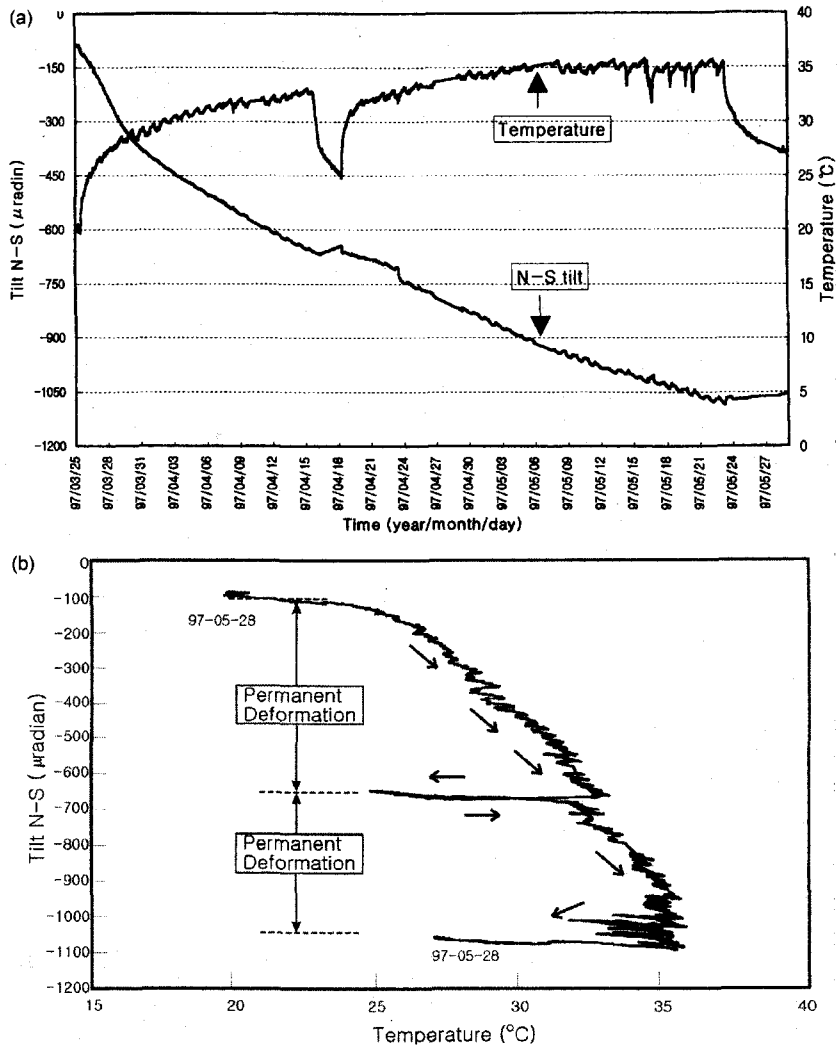


Fig. 7. (a) Tilt monitoring during the period of severe temperature change; (b) Hysteresis curve of movement of the frontal wall of the Muryong Royal Tomb with temperature variation.

거동치보다 약 2배 정도 많이 움직인 것으로 판단된다. 그러므로 대체로 우기에는 전기보다 그 변위가 약 2배에 달하는 것으로 판단되어 고분군 주위의 지반이 침투수에 노출될 우기에는 고분의 구조 안전에 심각한 문제가 있는 것으로 판단된다.

이와 같이 무령왕릉의 벽체거동의 현저한 반응은 온도변화와 강수에 기인되는 것으로 판단된다.

2.4. 왕릉내부 온도와 벽체거동

벽체거동과 온도와의 상관관계를 정량적으로 파악할 목적으로 1997년 3월 25일부터 5월 28일까지 계측된 센서 4의 남-북방향 벽체거동 및 온도의 시계열자료를 분석하였다(Fig 7). 연도입구 벽체의 온도변화에 따른 거동특성을 살펴보면 고분내의 제습기의 작동으로 온도가 20 °C에서 33 °C로 급격한 상승이 일어날 때 벽체는 남쪽의 전실방향으로 거동을 일으켰다. 그때의 거동비율은 고분내의 온도가 일정하게 유지될 때보다 훨씬 크다. 온도가 일정하게 유지될 때는 벽체가 0.43 mm/m·yr의 비율로 전실쪽으로 거동하는데 고분내의 온도가 급격한 상승을 보일 때는 거동비율이 6 mm/m·yr이다.

상승했던 온도가 다시 하강되면 벽체는 현실쪽으로 미약한 거동을 보일 뿐 온도가 상승하기 전의 상태로 돌아가지 않는다. 온도가 24 °C (122 μ rad)에서 33 °C (656 μ rad)까지 상승하였다가 다시 24 °C(645 μ rad)로 하강할 때의 벽체거동을 비교해보면 상승하기 전의 24 °C에서는 122 μ rad 인데 온도가 상승했다가 다시 하강했을 때의 기울기는 645 μ rad이다. 이처럼 벽체의 변형이 원점으로 돌아가지 않고 잔여 변형을 남기는데, 이는 무령왕릉의 벽체가 남쪽으로 영구변형을 일으켰음을 의한다. 645 μ rad와 122 μ rad의 차이량인 523 μ rad 만큼은 영구변형(permanent deformation)으로 표현될 수 있다. 다시 온도가 상승하면 온도에 따른 벽체의 거동은 이와 같은 이력현상(hysteresis)을 보여준다. 이것은 온도가 상승되었다가 다시 하강하여도 변형된 벽체거동이 완전히 회복되지 않았음을 의미한다. 이는 벽체의 온도에 대한 거동특성이거나 또는 온도에 의한 변형이 구조 전체의 토압에 의한 운동방향으로 발생하여 원상태로 회복되지 않았을 가능성을 시사한다. 이

523 μ rad 에서 온도가 일정하게 유지될 때의 벽체 거동량인 46 μ rad을 제거하면 477 μ rad 가 나오는데 이는 순수온도상승에 의한 잔류벽체거동량을 나타낸다. 온도상승에 따른 이런 변형이 센서 자체의 거동이라고 본다면 온도가 다시 하강하면 다시 제자리로 돌아와야 하는데 그렇지 않다는 것은 이것이 온도상승에 의한 순수 벽체거동임을 의미한다.

그러므로 고분내부에 온도상승을 유발하는 기기의 설치는 구조안전에 위험을 초래할 것으로 판단된다. 이러한 점을 감안할 때 고분내부의 온도를 항온으로 유지하는 것이 고분안전을 위하여 매우 중요한 것으로 판단된다.

3. 강회다짐층 균열조사

한편 무령왕릉의 장축방향을 따라 북쪽으로부터 측정된 GPR 단면도를 보면 원지반과 강회다짐층 경계부가 뚜렷이 구분되고 있으며 무령왕릉의 전실 남쪽에서 원지반의 일부가 잔존하는 것으로 판단된다. 또한 무령왕릉의 북측에는 무령왕릉 구간보다 반사도가 약한 반사면이 존재하는 것으로 보아 연약한 지층이 존재하는 것으로 판단된다. 또한 연도 중앙 부분이 반사도가 약해지며 불규칙한 특징을 보이는데, 이곳으로 빔물이 새는 점과 연도중앙부 벽돌이 흘러내린 점과 연관성이 있을 것으로 판단된다.

누수방지를 위하여 1991년 시공된 강회다짐층에 대하여 균열의 발달 상황 및 강회다짐층 현황에 대한 조사를 실시하였다. 무령왕릉 주위에는 다수의 균열이 서로 연결되어 나타나며 그 폭은 미세한 틈으로부터 4 mm 폭까지 다양하였다. 5호분과 6호분에서와는 달리 무령왕릉 상부의 강회다짐층에서만 균열이 다수 발견되는 현상은 매우 특이하다. 특히 균열의 분포가 무령왕릉의 북서쪽과 남동쪽으로 집중적으로 발생하였으며(Fig. 8), 무령왕릉의 현실과 연도를 연결하는 구조적 취약지점에서 동서 방향으로 길게 발달되어 있는 현상은 무령왕릉의 구조 변형과 관련이 있는 것으로 해석된다(Fig. 8).

1996년 10월 1일부터 1997년 9월 30일까지 1년간 무령왕릉의 벽체거동양상은 전반적으로 남쪽 방향성분이 우세하다.³ 무령왕릉의 현실구조가 남

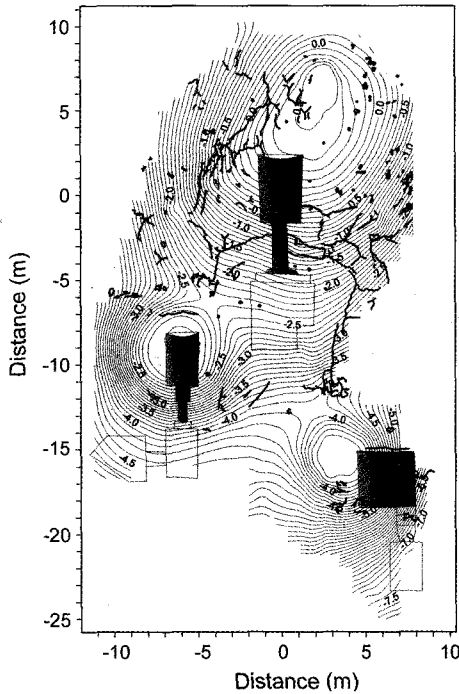


Fig. 8. Distribution of cracks on the surface the quicklime layer constructed to prevent water leakage.

동쪽성분이 우세한 비틀림운동을 하기 때문에(Fig. 3) 그 상부에 있는 강회다짐층이 무령왕릉의 북서쪽과 남동쪽에서 균열이 주로 발생한 것으로 해석된다. 이러한 사실로 볼 때, 현재의 구조적 문제를 해결하지 않으면 누수방지층을 재시공한다해도 역시 동일한 문제점이 야기될 것으로 판단된다.

4. 지하수 문제

송산리고분군에 대한 종합 정밀조사³에서 밝혀진 바와 같이 송산리고분군의 무령왕릉은 여름철 집중 강우시 심한 누수현상이 발생하고 있으며, 이 기간 동안 벽체거동이 더욱 급격하게 일어나는 것으로 관측되었다. 따라서 고분군 주변의 지표면을 통하여 침투하는 지하수는 고분군 내부로의 지하수 유입 자체의 문제뿐만 아니라 지반의 지지력 약화를 초래하여 고분군 벽체의 변위를 가속시키는 구조적인 문제를 함께 일으키는 것으로 밝혀졌다.

무령왕릉의 누수현상을 일으키는 지하수의 침투

경로는 주로 두 가지로 예상된다. 첫째는 고분군 상부의 누수방지층에 발생한 균열을 통한 지하수의 직접적인 유입을 들 수 있다. 둘째는 고분군 북부의 고지대에 떨어진 빗물이 지하로 침투하면서 상대적으로 저지대에 위치하는 고분군 방향으로 이동하여 고분군의 북측 벽체에 누수를 일으키는 지형적인 요인에 의한 유입으로 예상된다.

두 번째 요인 즉 지형적인 요인에 의한 지하수의 유입 경로와 그 정도를 추정하기 위하여 고분군 북측 능선에 수조를 설치하고 소방차를 동원하여 인공함양시험을 실시한 결과,¹³ 고분군 축조 과정에서 만들어진 다짐층(BH-2)의 투수계수가 풍화암과 연암으로 구성된 원지반(BH-3)의 투수계수(2.2×10^{-4} cm/sec)보다 작아서 고분군이 일단 빗물이 침투하면 원지반보다 배수가 불량한 것으로 밝혀졌다. 이는 1997년 4월부터 9월까지 두 공에서 관측한 수위변화 특성과 일치한다(Fig. 6). 고분군 부지의 함수비가 높을 경우 지반의 지지력이 약화되고 이로 인하여 왕릉구조의 거동이 심화되므로 왕릉 부지내로의 빗물의 침투를 차단하는 것이 왕릉보존에 있어서 무엇보다 중요한 것으로 판단된다.

함양시험 동안 무령왕릉 내부에서 누수현상을 관측할 수 없었으며, 시험 시작 후 약 15시간이 경과한 후부터는 비교적 일정한 함양율을 보여 wetting front가 수직적으로는 지하수면에 이르렀으며, 수평적으로는 더 이상 진행하지 못하는 것으로 해석되었다.¹³ 3개의 시추공에서 측정된 수위 자료로부터 wetting front의 변화를 분석한 결과 고분군과는 4 m 이상의 거리에 위치하는 것으로 나타났다.

결과적으로 고분군 누수현상의 주된 원인은 고분군 상부에 설치된 누수방지층에 균열이 발생하여 제 역할을 하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 누수방지를 위해서는 기존의 누수방지층의 보강이 더 시급한 것으로 판단된다.

5. 결론

무령왕릉의 구조안전 및 보존과학적 측면에서의 문제점을 파악하고 그에 대한 원인규명 및 보존대책을 수립하기 위하여 수행된 지반공학적인 연구를 통하여 무령왕릉의 구조거동 및 지반상태에 대한

현상과 원인을 밝히고 그에 대한 대책을 제시하였다. 무령왕릉의 구조거동은 전체적으로 남쪽방향으로 일어나며 동측벽 및 서측벽은 바깥쪽으로 미약한 거동을 보여 구조안전에 문제가 있는 것으로 판단된다. 왕릉의 구조거동은 우기에는 그 변위가 건기의 약 2배에 달하는 것으로 판단되어 고분군 주위의 지반이 침투수에 노출될 우기에는 고분의 구조안전에 심각한 문제가 있으며, 또한 무령왕릉의 벽체거동의 현저한 반응은 왕릉내부의 온도변화와 강수에 기인되는 것으로 판단된다. 또한 연도입구 벽체의 온도변화에 따른 거동특성은 온도가 급격한 변화를 일으킬때 최대 $6 \text{ mm/m} \cdot \text{yr}$ 의 거동비율로 전실쪽으로 거동하는데, 온도가 다시 하강하여도 원래 상태로 돌아가지 않는 이력현상을 나타내므로 현실내부의 온도를 항온으로 유지시킬 필요가 있다.

무령왕릉부지의 지하수환경에 대한 연구결과 투수율은 원지반보다 낮아서 배수가 불량한 것으로 해석되므로 왕릉부지내의 지하수침투를 적극적으로 차단할 필요가 있다. 무령왕릉 상류 구배로부터의 지하수유입은 우려할 수준이 아니며 주된 침투는 왕릉상부의 누수방지용 강회다짐층의 균열현상 때문으로 확인되었다. 무령왕릉 주위에서 발견되는 다수의 균열은 주로 북서쪽과 남동쪽에 집중되어 일정한 방향의 장력의 존재를 지시하며, 이는 무령왕릉의 벽체거동 방향과 연관성이 있는 것으로 해석된다. 이러한 사실은 구조 변형에 대한 대책이 없는 한, 새로운 시공을 하여도 균열이 재발될 것을 예측케 한다.

무령왕릉의 보존을 위한 보수대책은 남쪽방향으로의 벽체거동을 저지하는 구조안전대책과 누수방지대책이 가장 중요한 것으로 판단된다. 그러므로, 무령왕릉의 관람용 전실을 원래대로 복구하여 구조 변형요인을 제거한 후 현재의 누수방지용 강회다짐층을 정밀보수 또는 재시공하여야 할 것으로 판단된다. 누수방지시설 시공시 지반의 함수비 및 지하수위를 연속으로 계측할 수 있는 TDR (Time Domain Reflectometry)시스템을 고분주위 및 3개 보링공에 설치하여 효과적인 보수여부, 치수시스템의 손상여부 및 지하수위의 변동 여부를 파악할 필요가 있다.

6. 사사

이 연구는 문화재 보존복구대책의 일환으로 수행된 “송산리고분군의 현황과 보존대책” 연구의 일부로서 문화재청, 충청남도, 공주시의 관계관 여러분들의 행·재정적 지원에 감사드립니다. 또한 기술적 지원을 하여주신 (주)비투엔지니어링과 (주)태창기초지질의 관련자들에게도 감사사를 드립니다.

7. 참고 문헌

1. 문화재관리국, “무령왕릉 발굴보고서”, 1973.
2. 윤무병, “무령왕릉의 구조”, 공주대학교 백제문화연구소 간행, ‘백제 무령왕릉’, 1991: pp 113-129.
3. 서만철, “송산리고분군의 현황과 보존대책”, 공주대학교 기초과학연구소, 충청남도 공주시 1997.
4. 김유선, “백제 무령왕릉 발굴지후의 보존과학 조사연구 개황”, 문화재안전과 학연구회 학술심포지움 논문집 ‘백제무령왕릉의 보존대책’, 1997: pp 3-17.
5. 서오선, 이남석, “송산리 고분군의 향후 보존방향”, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 ‘백제무령왕릉의 보존대책’, 1997: pp 177-187.
6. 정상만, 임경호, 이우진, 서만철, “송산리 고분의 누수원인 분석”, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 ‘백제무령왕릉의 보존대책’, 1997: pp 91-104.
7. 서만철, 박은주, “경사도변화 계측을 통한 백제 송산리고분군의 지하벽체거동 특성과 안정성,” *대한지질공학회지*, 7(3), 191-205 (1997).
8. 이우진, 임형덕, 안신환, “수치해석을 이용한 무령왕릉의 안전성검토와 대책,” 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 ‘백제무령왕릉의 보존대책’, 1997: 73-87.
9. 이병호, “武寧王陵의 벽체 및 지반변위에 관한 이론적 고찰,” 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 “백제무령왕릉의 보존대책,” 1997: pp 157-174.
10. 강준목, “백제 무령왕릉 정밀측량 및 공간 분석,” 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 ‘백제무령왕릉의 보존대책,’ 1997: 21-37.
11. 서만철, 이창환, 정계옥, 김동현, “송산리고분군의

지구물리학적 조사를 통한 고분축조방법 고찰,”
보존과학회지, **6(1)**, 61-70 (1997).

12. 이태녕, “보존과학적 측면에서 본 무령왕릉,” 공
주대학교 백제문화연구소 간행, *백제문화*, **21**,
177-196 (1991).
13. 구민호, 서만철, “공주 송산리고분군 누수현상 원
인 분석을 위한 인공함양시험 및 수치모델링,”
지질공학, **9(1)**, 1-15 (1999).