The Journal of Engineering Geology, Vol.7, No.3, December, 1997, pp.191-205

경사도변화 계측을 통한 백제 송산리 고분군의 지하 벽체거동특성과 안정성

Characteristics of Subsurface Movement and Safety of the Songsanri Tomb Site of the Baekje Dynasty using Tiltmeter System

서 만 철 (Suh, Man-Cheol) 공주대학교 지질환경과학과
박 은 주 (Park, Eun-Ju) 공주대학교 지질환경과학과

요약 / ABSTRACT

백제 시대의 대표적 문화재들이 다수 출토된 무령왕릉을 포함한 송산리 고분군에 대한 고분벽체의 거동을 장기적으로 계측하여 분석하였다. 본 연구는 송산리 고분군의 안정성을 판단하여 보존대책을 수립하기 위한 목적으로 이루어졌으며, 각 고분의 중요지점에 총 11개의 2축 경사변화측정센서를 설치하고 매 20분마다 자동계측하여 약 15개월 동안(1996년 7월 14일~1997년 9월 30일) 관측을 실시하였다.

무령왕릉의 벽체거동은 연도입구의 호벽이 최대거동을 보여 직각변위(N-S Tilt) 성분이 2.3㎜/m/yr로 남쪽방향인 전실쪽으로 거동하고 있는 것으로 밝혀졌다. 무령왕릉 현실 서측벽의 남쪽 등 상감 상부의 벽돌이 1971년 발굴 이후 남쪽으로 기울어진 변형을 보이며 고분구조가 남쪽 방향으로 거동함을 증명하고 있다. 현실 동측벽의 거동 또한 1.523㎜/m/yr로 현실 내부로의 거동이 심한 편이다. 더구나 우기에는 그 변위가 약 2배에 달하는 것으로 판단되어 고분군 주위의 지반이 침투수에 노출되는 우기에는 고분의 구조안전에 심각한 문제가 있는 것으로 판단된다.

5호분은 전체적으로 벽체의 전후방향 거동이 벽체의 전단방향 변위보다 크게 나타난다. 또한 텔트의 급격한 불연속은 없고 일정한 방향으로 계속적인 미약한 변동을 보이고 있다. 6호분 역시 건기의 최대 거동수치가 8.8㎜/m/yr로써 다른 고분의 우기시의 거동수치를 훨씬 초과한다.

고분벽체의 대·소의 변형 사건은 강수 및 온도변화와 밀접한 관련성이 있는 것으로 밝혀졌다. 온도변화에 의한 벽체거동의 영향은 고분내의 온도가 급격히 상승할 때는 온도가 일정하게 유지될 때보다 거동 비율이 훨씬 크다. 상승했던 온도가 다시 하강되면 벽체는 온도가 상승하기 전의 상태로는 돌아가지 않고 잔여변형을 발생시켜 영구변형으로 남게 되는 이력현상을 보이고 있다. 또한, 무령왕릉 주변의 지하수위 관측결과 현재 고분축조부지의 배수체계가 원지반보다 불량함을 의미하며, 불량한 배수체계는 고분의 구조안전에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이와 같이 고분군에 발생한 모든 변위들은 발굴 후 인위적인 환경변화와 지속적인 강우침투의 영향과 배

수분량으로 인한 주변지반 및 내벽의 물성치의 저하로 인하여 고분의 내벽에 상당량의 변위가 발생한 것으로 판단된다. 무령왕릉 벽체거동 특성 분석 결과 무엇보다 강우침투 및 지하수유입을 막는 차수대책이 시급하며, 고분내에 있는 제습기에 의한 온도상승효과를 제거하여야 할 것으로 판단된다.

Measurements on subsurface movement of the Songsanri tomb site including the Muryong royal tomb was conducted using a tiltmeter system for the period of 15 months form July 7, 1996 to September 30, 1997. Two coordinate tilt monitoring data shows the biggest movement rate of 2.3㎜/m/yr toward south in the frontal wall(N-S tilt) of the Muryong royal tomb. Southward tilting of bricks above the southern fire place in the western wall of the Muryong royal tomb is a proof of southward tilting of the royal tomb since its excavation in 1971. The eastern wall of the Muryong royal tomb is also tilting toward inside the tomb with the rate of 1.523㎜/m/yr. Furthermore, tilting rate of wall increases twice in rainy season. It is interpreted that infiltration of water into the tomb and nearby ground in rainy season results in dangerous status for the safety of tomb structure.

On the whole, normal component tilting of the walls of the 5th tomb is large than its shear component. It shows a small displacement toward one direction without no abrupt change in its direction and amount of tilting. The tilting rate of walls of the 6th tomb is about 8.8㎜/m/yr in the dry season which is much bigger than those of other tombs in rainy season.

Deformation events of walls of the tombs are closely related to amount of precipitation and variation of temperature. In comparison with different weather conditions, tilting is much bigger during the period of rainy weather than sunny weather. It is interpreted that rainwater flew into the turm through faults and nearby ground. High water content in nearby ground resulted strength of ground. The tilting event of walls shows a hysterisis phenomenon in analysis of temperature effect on tilting event. The walls tilt rapidly with steep rising of temperature, but the tilted walls do not come back to original position with temperature falling. Therefore, a factor of steep increase of the temperature must be removed. It means the tomb have to be kept with constant temperature.

The observation of groundwater level using three boreholes located in construction site and original ground represented that groundwater level in construction site is higher than that of original ground during the rainy season from the end of June to August. It means that the drainage system of the Muryong royal tomb is worse than original ground, and it is interpreted that the poor drainage system is related to safety of tomb structure.

As above mentioned, it is interpreted that artificial changes of the tomb environment since the excavation, infiltration of rainwater and groundwater into the tomb site and poor drainage system had resulted in dangerous situation for the tomb structure. According to the result of the long period observation for the tomb site, it is interpreted that protection of the tomb site from high water content should be carried out at first, and the rise of temperature by means of the dehumidifier inside the tomb must be removed.

서 론

송산리 고분군은 삼국사기 및 동국여지승람의 사료를 확인시킨 유일의 중요 문화유적인 무령왕릉을 포함하는 국가적으로 매우 중요한 문화유적이다. 이런 조상의 훌륭한 문화적 유물 및 유적을 안

전하게 보존하기 위해서는 이제 과학적인 방법을 동원하여 계측하고 그 결과에 따라 보존대책을 마련할 필요가 있다. 그러한 과정의 일환으로 지구물리학적 조사방법을 이용한 백제유적조사가 수행된 바 있으며(서만철 외, 1995) 백제문화의 대표라 할 수 있는 무령왕릉을 포함하는 송산리 고분군의 현황파악과 보존대책을 위한 고고학자, 자연과학자 및 공학자가 함께 참여하는 종합적인 연구가 이루어진 바 있다(서만철, 1997; 서만철 외, 1997).

송산리 고분군의 고분구조들이 지하에 위치하고 있어 지반의 변형에 따라 고분벽체가 거동을 하며 고분구조 자체의 안정성 또한 지반 문제와 직결되어 있다. 지반의 변형은 이동(translation movement) 및 회전(rotation) 등으로 구성되므로(Hobbs et al., 1976) 변위, 스트레인(normal and shear) 및 회전을 성분별로 면밀히 측정하면 지반 또는 물체의 변형을 파악할 수 있다(Agnew, 1986; Kumpel et al., 1988; 이상규, 1993). 무령왕릉에 관한 보존과학적 조사는 1971년 무령왕릉의 발굴직후 발굴보고서의 일부로서 진행된 바 있으며(문화재관리국, 1973; 김유선, 1997) 무령왕릉 내부의 벽체경사를 측정하여 보고된 바 있다(이태녕, 1972).

무령왕릉을 비롯한 송산리 5호분 및 6호분은 보존을 위하여 발굴이래 수차례의 보수과정을 거쳤으나 구조안전 측면에서의 접근은 미흡했던 것으로 알려져 있다. 송산리 고분군의 영구보존을 위한 관리상의 제반 문제점들을 파악하고, 보수를 위한 대책을 마련하기 위해서는 우선 현재의 고분상황에 대한 정확한 계측 자료가 있어야 한다. 따라서 본 연구는 충청남도 공주시 금성동 소재 송산리 고분군중 5호분, 6호분 및 무령왕릉(Fig. 1)의 보존 관리상의 제반문제점에 관하여 벽체의 2-축 틸트변화를 장기계측하고 그 자료를 처리, 분석함으로써 상기와 같은 문제점을 사전에 파악하고 이에 대비하고자 하는데 그 목적이 있다. 송산리고분군에 대한 벽체 경사변화의 상시모니터링은 1996년 7월 14일부터 1997년 9월 30일까지 약 15개월에 걸쳐 수행되었다.

고분벽체의 거동 계측

계측장비 및 설치

금번 연구에 사용된 장기계측장비는 경사변화계측기(tiltmeter), 모뎀 및 PC등 3개의 부분으로 이루어져 있다. 벽체 경사변화계측기는 미국의 AGI (Applied Geomechanics Inc.)사의 모델로써, 지구의 중력 방향을 기준으로 하는 고도로 정밀한 센서이다. 2-축 틸트를 감지하는 틸트메터는 전해관식(electrolytic type)으로 기포관의 원리를 이용한 것이다. 즉, 전해액이 삽입된 기포관의 입력단자로 입력된 전압은 전해액을 통과하면서 출력전압으로 바뀌어 출력되며, 기포관이 수평을 유지할 때, 출력전압은 0이 된다. 구조물이 경사변형을 일으키면 기포관내의 기포가 기울어지게 되며, 이때 동일한 입력전압에서 출력되는 출력전압이 변한다. 이 미소하게 변하는 아날로그 출력전압의 크기는 신호처리기(signal processor)에 의해 디지털 신호로 변환되어 출력되는 측정원리를 가지고 있다. Tiltmeter의 sensor는 측정기준이 지구의 중력방향이므로 기준점의 변동에 의한 오차가 없고, 기계적인 마찰이 발생하지 않으므로 반영구적이다. 또한 센서의 정밀도는 0.1 μradian 으로 매우 미세한 거동까지 측정될 수 있으며, 또한 센서가 가벼워 고분벽면에 손상없이 설치하여 원하는 시간 간격으로 자동계측이 가능하였다.

벽체거동 측정방법

송산리 고분군내의 벽체거동에 대한 장기적인 변형을 관찰하여 무령왕릉을 비롯한 고분의 안전성을 판단하기 위해서는 수동 측정에 의한 1회/1일-2일 정도의 측정빈도보다는 자동계측시스템에 의하여 짧은 측정 간격으로 장기간 계측하여야 소기의 목적을 이룰 수 있다. 따라서, 고분의 내부벽체의 거동여부 및 그 경향을 파악하기 위하여 무령왕릉에 4개, 5호분 4개 및 6호분 3개 총 11개의 고정밀 Tiltmeter sensor를 부착하여 20분 간격으로 연속측정 기록하였다(Fig. 2). Fig. 3은 고분벽체거동 자동계측시스템 구성도를 나타낸 그림인데 고분벽체에 설치된 11개의 Tilt sensor로부터 미약하게 출력되는 전압을 2대의 signal conditioner를 통하여 증폭시켜 data logger에 경사변화 데이터를 기록하였다. data logger에 저장된 자료는 무령왕릉 내에 설치된 전화선을 통하여 연구실의 자료처리용 컴퓨터와 연결하여 자료처리를 하였다. 11개의 sensor로

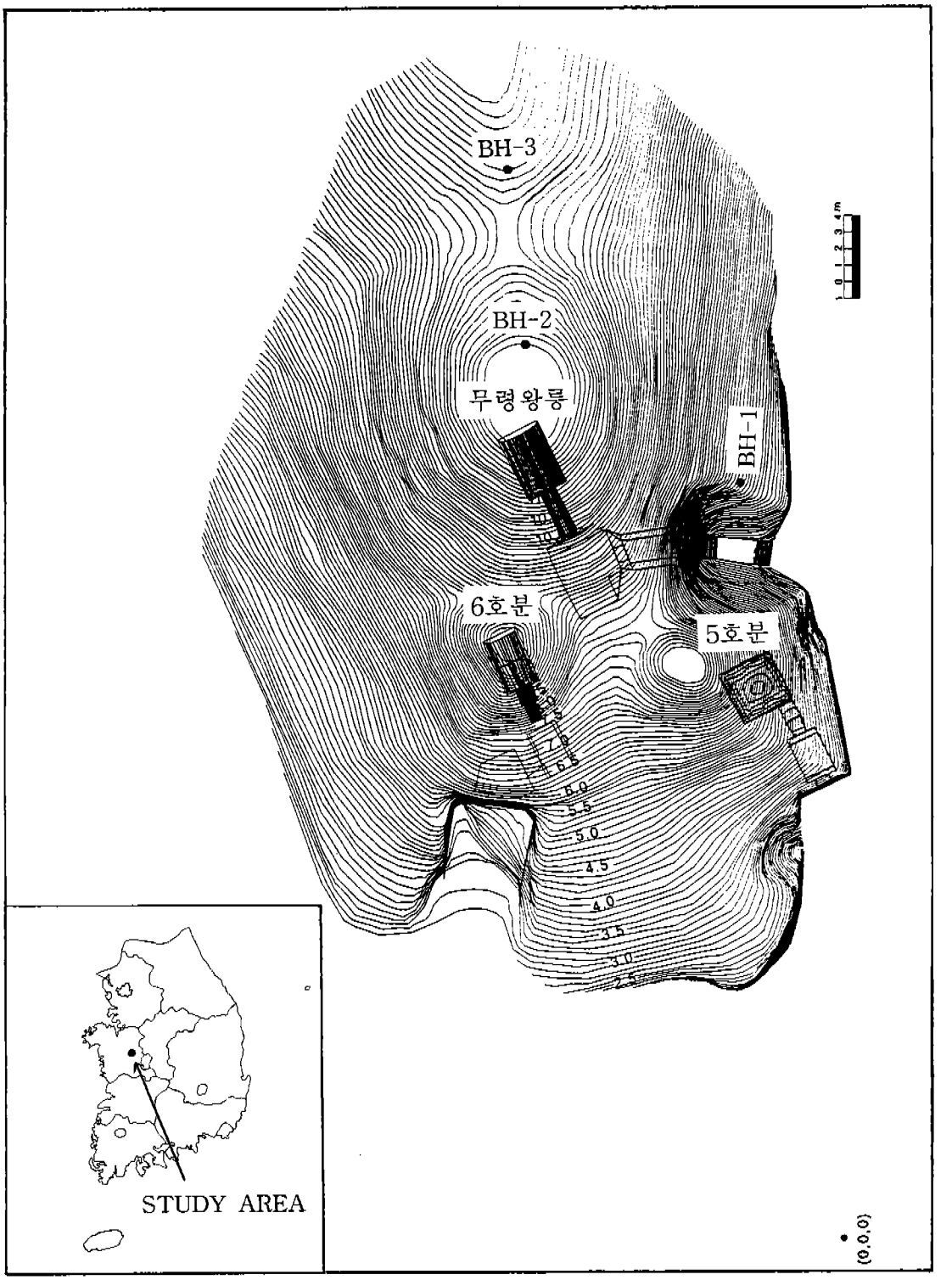


Fig. 1. Location map of Tombs of No.5 and No.6, and the Muryong royal tomb in the Songsanri tomb site. 3 bore holes are numbered for the measurement of ground water level.

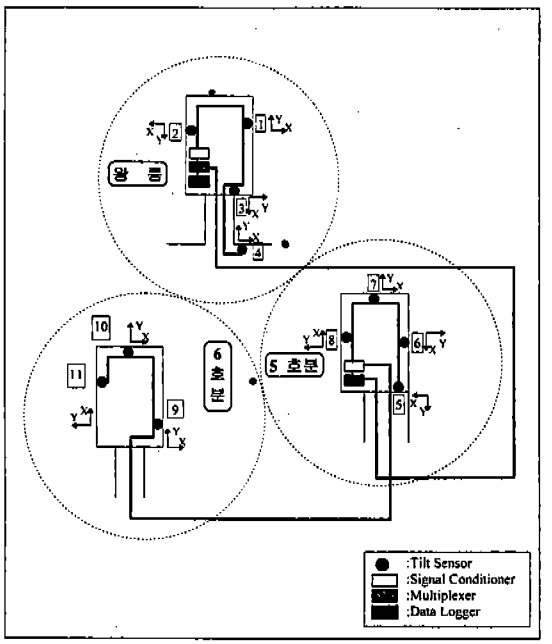


Fig. 2. A location diagram for installation of tiltmeter sensors inside the tombs.

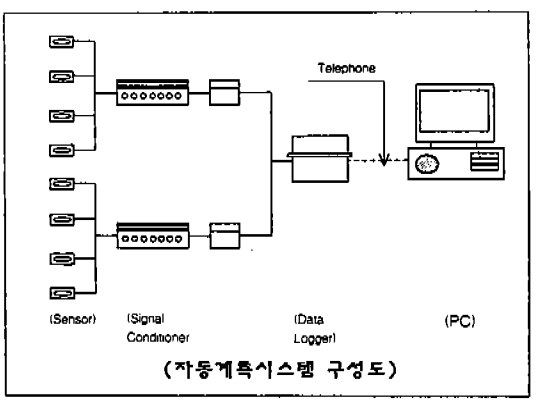


Fig. 3. Schematic diagram of automatic Tilt Monitoring System used for the detection of movement of underground tombs.

부터 매 20분 간격으로 들어오는 자료들은 그 양이 너무 많아 data logger에 저장될 수 있는 자료들이 제한되어 있어 3일마다 한번씩 data logger에 저장된 자료를 모뎀을 통하여 연구실의 자료 처리용 컴퓨터에 저장하였다.

1997년 9월 30일에 계측을 종료하고 그 동안 기록저장된 틸트자료를 전산처리 하였다. 각 Tilt sensor의 부착위치 및 축방향은 Fig. 2에 상세히 나타내었다. 고분벽체의 거동은 각 sensor별로 벽체의 전후방향과 벽체의 전단방향의 변위가 측정되었다.

고분벽체의 거동분석

무령왕릉

무령왕릉에 설치된 4개의 tilt sensor중 sensor 1, 2, 3은 1996년 7월 14일부터 측정을 하였으며 sensor 4는 추가로 설치되어 1997년 2월 14일부터 측정을 시작하였다. 계측자료 시계열에서 나타나는 offset 및 인위적인 불연속(artificial shift)을 메우기 위하여 컴퓨터를 이용한 graphic editing 을 수행한 후, 전산처리된 틸트자료는 Fig. 4에 나타내었는데 그래프의 횡축은 측정시각을 일(day) 단위로 표시하였으며 종축은 경사변화를 μradian 단위로 나타내었다. 종축의 틸티중 +는 벽체뒤쪽으로, -는 석실쪽으로의 변위를 의미한다.

Fig. 4의 a, b, c, d 그리고 e는 각 sensor의 수직성분의 틸팅을 나타내고 있다. 무령왕릉 현실 동측벽에 설치된 sensor 1은 처음 20일간은 측정치가 감소하다가 지속적으로 증가하는데 이는 sensor를 고정시키기 위한 접착제의 응고현상에 따른 sensor 자체의 거동으로 해석된다. 즉 접착제가 응고되면서 sensor를 벽체쪽으로 기울게하여 측정치가 증가된 현상이므로 실제 벽체의 거동과는 무관한 것으로 판단된다. 1996년 8월 5일 이후는 접착제가 완전히 응고되어 sensor와 벽체가 함께 거동한 것으로 판단된다. 무령왕릉 현실동측벽의 거동은 1996년 10월 4일까지 60일동안 현실쪽으로 거동한 것으로 판단되며 거동량은 약 484 μrad 이며 경사변화는 약 0.5㎜/m 이다. 이는 년간 경사변화량으로 환산하면 약 3㎜/m/yr이다. 1997년 10월 11일 무령왕릉내부 제습장치의 보수공사후 제습장치의 가동으로 인하여 현실 내부 온도가 약 10℃ 상승함에 따라 tiltmeter 측정치가 상당히 증가하였는데 그때의 벽체거동량은 약 1000μrad 였다. 이는 온도상승에 따른 효과와 제습기보수공사시 벽체에 힘을 가했기

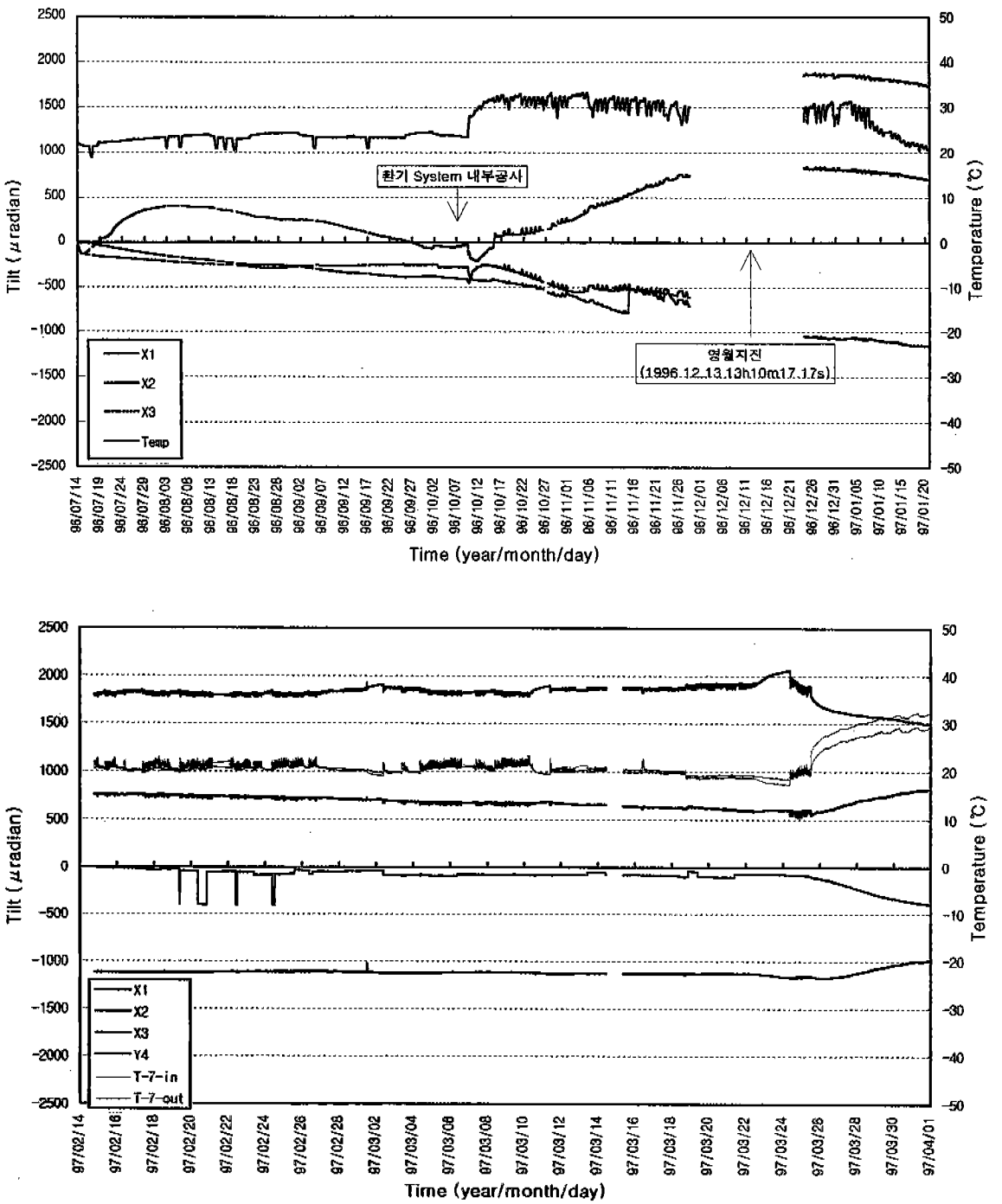
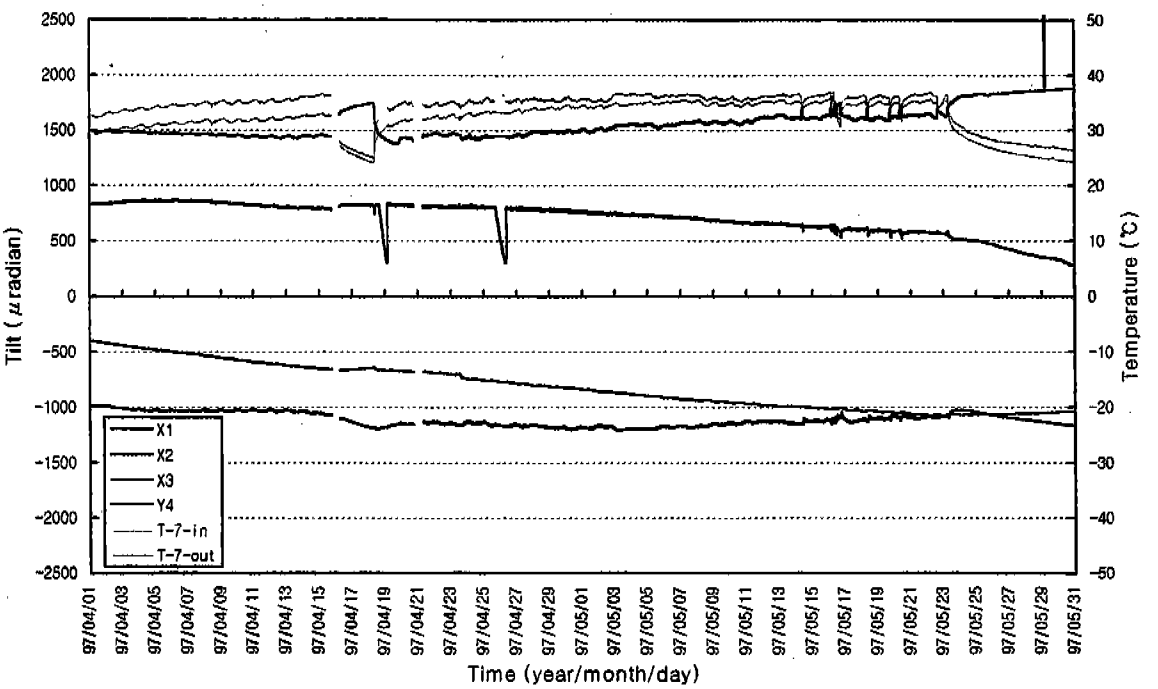


Fig. 4. Monitoring data for the movement of walls of the Muryong royal tomb (normal component, sampling interval is 20 minutes).



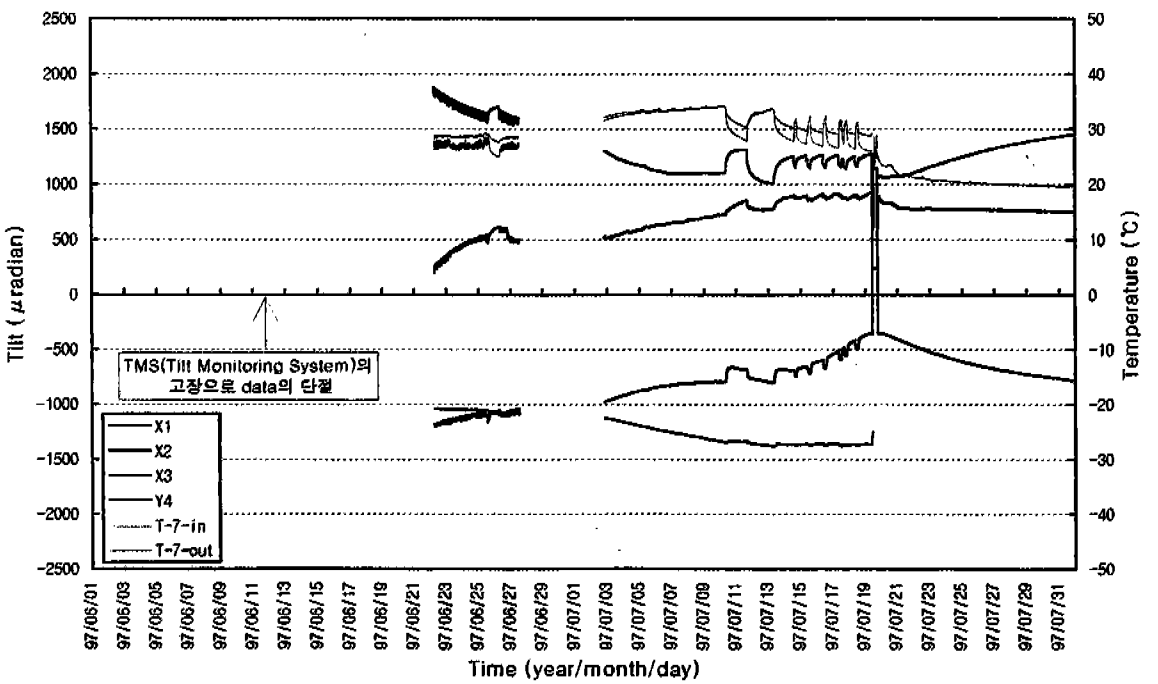


Fig. 4. Continued

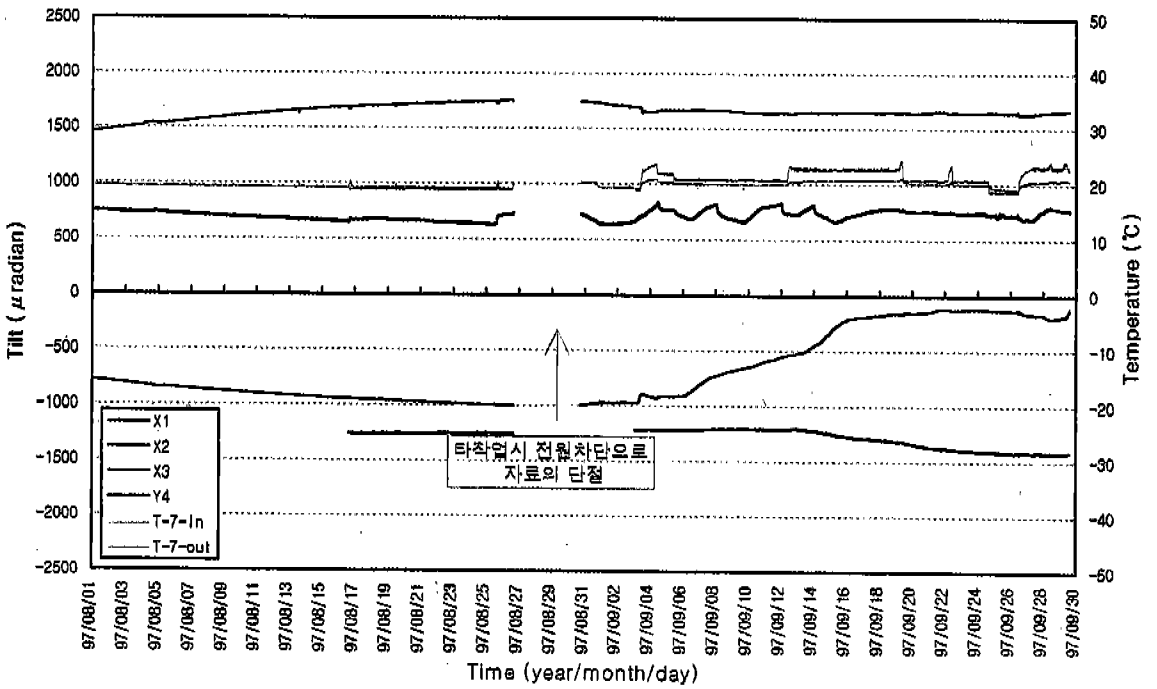


Fig. 4. Continued

때문인 것으로 해석된다.

1997년 2월 14일 이후 3월 25일 제습기정상작동으로 인하여 온도가 급상승 될 때까지 40일간 무령왕릉 현실 동측벽은 현실쪽으로 약 167μrad 거동하였으며 이를 연간 벽체경사변화도로 환산하면 1.523㎜/m/yr이다. 이처럼 무령왕릉 현실 동측벽의 전반적인 거동은 온도상승에 따른 효과를 제거하면 현실쪽으로 거동하고 있는 것으로 판단된다.

우기를 지나 지반이 지하수로 충진된 8월과 건기를 지난 2-3월의 벽체거동 수치를 비교하면 지반이 지하수로 충진된 8-9월의 거동치가 2-3월의 거동치 보다 약 2배정도 많이 움직인 것으로 판단된다.

한편 1997년 3월 25일 이후의 각 tilt sensor에서 공통적으로 발견되는 급격한 불연속은 이때부터 정상 작동한 제습기의 영향으로 현실 내부의 온도가 약 15℃ 상승함으로서 온도상승 기간 동안 534μrad 만큼의 틸트를 보였다. 이러한 온도이상현상이 제거된 후에는 역시 비슷한 속도로 벽체가 현실 쪽으로 거동하는 양상을 보이고 있다. 한편, 무령왕릉 현실 동측벽의 전단변위는 북쪽으로 미약한 회전을 보이고 있다. 전단변위 역시 8-9월에는 0.827㎜/m/yr, 2-3월에는 0.354㎜/m/yr로써 우기의 벽체거동량이 건기보다 약 2배이상 큰 거동을 보이고 있다. tilt sensor 1의 직각변위 및 전단변위를 고려할 때 동측벽은 서북서(WNW) 방향의 왕릉내부로 거동하고 있는 것으로 판단된다.

서측벽(Sensor 2)은 8-9월에는 1.418㎜/m/yr의 비율로 현실쪽으로 거동하였으며 건기인 2-3월에는 0.171㎜/m/yr의 경사변화율을 보이고 있다. 서측벽의 전단변위 역시 계절별로 비슷한 경향을 보이며 8~9월에는 0.398㎜/m/yr, 2~3월에는 0.224㎜/m/yr의 비율로 남쪽으로 거동을 보인다. tilt sensor 2의 직각변위 및 전단변위를 고려할 때 서측벽은 동남동(ESE) 방향의 왕릉내부로 거동하고 있는 것으로 판단된다. 서측벽은 수직변위는 제습기가 작동하여 온도가 증가할 때는 벽체가 벽체 뒤쪽으로 거동하고, 온도가 감소하면 현실쪽으로 거동한다. 이와 같은 온도에 의한 영향을 제거하면 전반적인 거동 경향은 직각변위는 현실쪽으로 거동하고 전단변위는

남쪽으로 거동을 보여 전체적으로 동남동 방향의 거동을 보이는 것으로 판단된다. Fig. 5의 서측벽의 벽돌깨짐을 살펴보면 전단변위가 남쪽으로 발생하고 있음이 확실히 입증된다. 1972년 현장에서 작성된 고분 내부 도면에 의하면, ①~⑤ 벽돌이 상하부에 가로로 놓인 벽돌과 대체적으로 직각으로 위

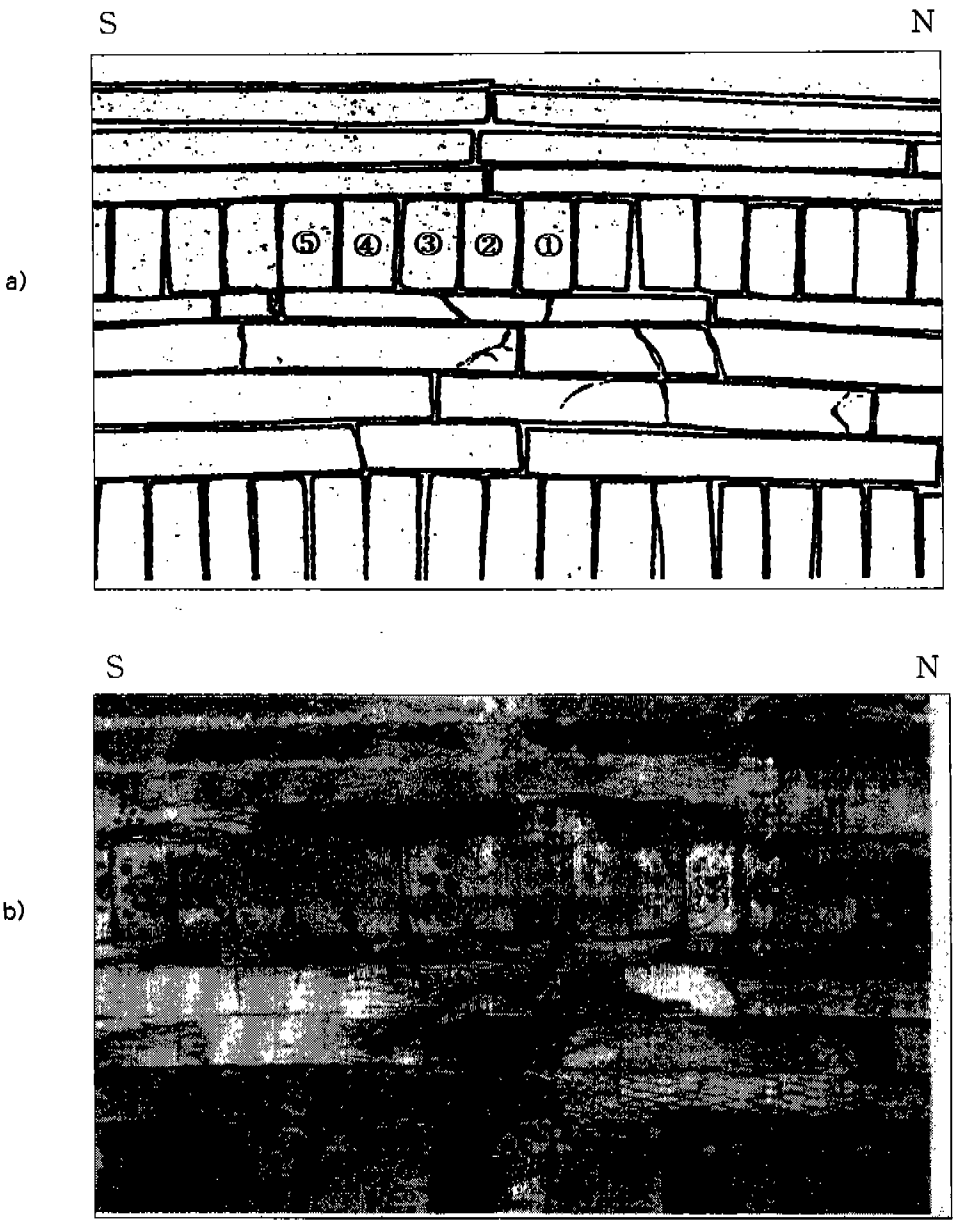


Fig. 5. a) Drawing of bricks above the southern fire place in the western wall of the Muryong royal tomb (drawn in 1972).
b) Picture of the same bricks mentioned in a) in 1997.

치하고 있다(윤무병, 1991). 그러나, 동일 부위에 대한 1997년 촬영된 사진을 보면, 해당 벽돌들이 남쪽으로 기울어져 있는 현상을 보이고 있다. 이는 1971년 발굴 이후 현재까지 서서히 진행된 변형의 결과로서 현실 서측벽에 설치된 tilt sensor 2번의 계측결과 남쪽으로의 미약한 벽체거동 양상과 일치하고 있다.

남측벽(Sensor 3)은 8-9월에 현실방향으로 0.071㎜/m/yr의 아주 미약한 거동을 보이다가 1996년 12월 13일 규모 4.5의 영월지진의 영향으로 2500 μrad의 대폭적인 거동이 발생하였다. 2-3월에는 그 거동방향이 바뀌어 0.935㎜/m/yr의 비율로 남쪽으로 거동하고 있다. 영월지진의 공주에서의 진도는 진도 Ⅲ으로서 진동가속도는 75-85 dB 정도이다(천병식, 오재웅, 1993). 이러한 지진에 대하여 유독 남측벽에 설치된 sensor 3 만 심한 변위를 일으킨 점으로 보아 sensor를 설치한 벽돌이 고정되지 않은 벽돌로 해석된다. 건기인 2~3월에 0.935㎜/m/yr의 비교적 높은 거동비율을 보이는 것은 고정되지 않은 벽돌이 지진에 의하여 심한 변위를 일으킨 후 원래의 상태로 회귀하는 과정으로 해석된다. 남측벽 또한 제습기작동으로 인한 온도상승시에는 벽체가 내측으로 거동하지만 이런 온도에 의한 영향을 제거하면 벽체는 계속적으로 남쪽으로 거동하는 것으로 판단된다.

연도입구 호벽의 거동경향(Sensor 4)은 1997년 2월 14일부터 측정된 바, 직각변위는 남쪽의 전실방향으로 계속 거동하며 전단변위는 연도쪽으로 발생하고 있다. 계측기간 동안(1997. 2. 14 - 1997. 9. 30)의 총 변위량은 직각변위량은 1443 μrad로써 년간 변위량으로 환산하면 2.3㎜/m/yr이고, 전단변위량은 1002 μrad로써 1.6㎜/m/yr의 비율로 이동하고 있다. 이처럼 연도입구 호벽은 계속 같은 방향으로 거동하고 있기 때문에 구조안전에 심각한 문제가 있는 것으로 판단된다.

무령왕릉에 설치된 tilt sensor 자료분석 결과 틸트의 최대변화는 연도입구 호벽의 직각변위 성분이 2.3㎜/m/yr로써 가장 심하며 현실동측벽의 거동 또한 1.523㎜/m/yr로써 심한 편이다. 더구나 우기에는 그 변위가 약 2배에 달하는 것으로 판단되어 고분군 주위의 지반이 침투수에 노출될 우기에는 고분의 구조안전에 심각한 문제가 있는 것으로 판단된다. 이와 같이 무령왕릉의 벽체거동의 현저한 반응은 온도변화와 강수에 기인되는 것으로 판단된다.

5호분

5호분내의 Sensor들은 2월부터 4월까지는 급격한 불연속이 없이 일정한 방향으로 계속적인 미약한 변동을 보이다가 그 이후에는 타작업시 자료전송선의 절단으로 5월 20일 이후부터는 자료를 얻지 못했다.

계측기간(2월 14일~5월 20일)내의 남측벽(Sensor 5)의 총 변위량은 벽체뒤쪽으로 468 μrad(1.8㎜/m/yr), 동측벽(Sensor 6)은 석실쪽으로 1817 μrad(7㎜/m/yr), 북측벽(Sensor 7)은 석실쪽으로 186 μrad(0.72㎜/m/yr) 그리고 서측벽(Sensor 8)은 벽체쪽으로 651 μrad(2.5㎜/m/yr)의 틸트변화 경향을 보인다. 특히, 동측벽의 변위량은 1817 μrad로써 연간 벽체경사변화도로 환산하면 7㎜/m/yr이다.

석실 남측벽의 전단변위는 동쪽으로 377 μrad (1.5㎜/m/yr)의 변위을 보이고, 동측벽은 북쪽으로 414 μrad (1.6㎜/m/yr)의 미약한 변위을 보인다. 북측벽은 서쪽으로 449 μrad의 변위을 보이고, 서측벽의 변위량의 크기는 남쪽으로 34 μrad이다.

5호분은 전체적으로 벽체의 전후방향 거동이 벽체의 전단방향 변위보다 크게 나타난다. 또한, 틸트성분의 급격한 불연속은 없고 일정한 방향으로 계속적인 미약한 변동을 보이고 있다. 동측벽과 서측벽은 서쪽으로 거동하고 있고 북측벽과 남측벽은 남쪽으로 거동하고 있음을 볼 수 있다.

6호분

6호분 역시 5호분과 마찬가지 이유로 5월 20일까지의 자료만 얻었다. 동측벽에 설치된 Sensor 9의 직각변위는 5월 6일(81일간)까지 벽체뒤쪽으로 1962 μrad의 변위을 보이고, 이것을 연간 벽체경사변화도로 환산하면 8.8㎜/m/yr이다. 그 이후부터는 현실쪽으로 서서히 거동하다가 다시 벽체뒤쪽으로 미약한 변위를 보이고 있다. 한편, 전단변위의 변위량은 북쪽으로 미약한 변위를 보인다.

북측벽에 설치된 Sensor 10의 수직변위는 계측기간동안(95일간) 벽체쪽으로 309 μrad의 미약한 변위을 보이고, 전단변위는 서쪽으로 미약한 변위를 보인다. 서측벽에 설치된 Sensor 11의 수직변위

는 현실쪽으로 계측기간 동안 1286μrad 만큼 거동했고, 이를 연간변화량으로 환산할 경우 5㎜/m/yr 만큼 기울고 있는 것으로 판단된다. 전단변위는 북쪽으로 349μrad (1.3㎜/m/yr) 만큼 거동을 보인다. 6호분 역시 5호분과 마찬가지로 계측기간내의 고분내의 온도가 거의 일정하게 유지되고 있기 때문에 벽체거동의 급격한 불연속이 없고 거의 일정한 비율로 거동하고 있다. 6호분의 벽체거동 계측은 1997년 2월 14일부터 이루어진 바, 건기의 거동수치가 다른 고분의 우기시의 거동수치를 훨씬 초과한다. 이는 6호분의 구조안전이 더욱 심각한 상태임을 의미한다.

고분벽체거동의 영향요소 분석

기상조건의 영향

벽체거동 자료와 일별 강수량 자료를 비교해 보면 계측 기간 중에 나타나는 대·소의 변형 event는 대부분 강우와 관련되어 있음을 알 수 있다. 송산리 고분군의 강우량을 파악하기 위해서 1989년 11월 이후 건설교통부 금강 홍수통제소에서 관리하고 있고, 텔레미터(telemeter)로 운영되고 있는 공주 우량관측소를 선정하였다. 공주 우량관측소는 공주시 금성동 구 수방통신소에 위치하고 있어 송산리 고분과 비교적 가까운 거리에 있으므로 자료의 신빙성에 문제가 없을 것으로 판단된다.

일별 강수량자료와 벽체거동 자료를 비교해 보면, 계측기간 중에 계측지점에서 몇몇 의미있는 사건(Significant event)이 발생하였는 바, 97년 7월 1일부터 7일까지(a), 7월 11일부터 16일까지(b), 8월 1일부터 11일까지(c) 그리고 8월 20일부터 26일까지의(d, 전형적인 맑은 날씨) event들이다.

a, b, c 는 동기간 중 각각 302, 110 및 234㎜ 등 비교적 많은 비가 온 기간이었고, d는 전형적인 맑은 날씨였다. 이때 무령왕릉내의 각 센서들의 틸트 변화량을 표로 나타내면 Table 2와 같다.

그리고 계측기간중 무령왕릉 주변에 10m 깊이의 3개의 시추공을 시추하여(Fig. 1) 고분주위의 지하수위를 측정하였다(Fig. 6). 1호공은 무령왕릉 입구에 위치하며 지반표고는 베이스 기준 6.2m이며, 2호공과 3호공은 무령왕릉의 북쪽에 축조지반 및 원지반에 시추하였으며 지반표고는 각각 12.1m, 11.4 m 로서 거의 같은 높이에 시추되었다(Fig. 1). 비가 많이 내린 기간의 지하수위를 보면, 예를 들어 무령왕릉 입구에 위치한 1호공으로부터의 지하수위 측정결과를 보면 지표로부터 6.5~7.5m, 무령왕릉 현실 바닥으로부터 5.7~6.7m 하부에 지하수위가 위치하고 있다. 그러나, 무령왕릉 북측에 위치한 시추공 2호공의 경우 집중호우시 지하수위가 무령왕

Table 1. movement data of walls of underground tombs

Sensor		관측기간	변화량			방향	비 고
			μrad	㎜/m	연간변화량		
Sensor 1	X 방향	96.8.5 - 96.10.4(60일)	484	0.484	2.945	-	직각변위 (7호분 동서방향)
		97.2.14 - 97.3.25(40일)	167	0.167	1.523	-	
	Y 방향	96.8.5 - 96.10.4(60일)	136	0.136	0.827	+	전단변위 (7호분 남북방향)
		97.2.14 - 97.3.25(40일)	39	0.039	0.354	+	
Sensor 2	X 방향	96.8.5 - 96.10.4(60일)	233	0.233	1.418	-	직각변위 (7호분 동서방향)
		97.2.14 - 97.3.25(40일)	19	0.019	0.171	-	
	Y 방향	96.8.5 - 96.10.4(60일)	65	0.065	0.388	+	전단변위 (7호분 남북방향)
		97.2.14 - 97.3.25(40일)	25	0.025	0.224	+	
Sensor 3	X 방향	96.8.5 - 96.10.4(60일)	12	0.012	0.071	-	직각변위 (7호분 남북방향)
		97.2.14 - 97.3.25(40일)	102	0.102	0.935	+	
	Y 방향	96.8.5 - 96.10.4(60일)	71	0.071	0.432	+	전단변위 (7호분 동서방향)
		97.2.14 - 97.3.25(40일)	21	0.021	0.191	-	
Sensor 4	X 방향	97.2.14 - 97.3.25(40일)	225	0.225	2.053	-	전단변위 (7호분 동서방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.3.25(40일)	47	0.047	0.429	-	직각변위 (7호분 남북방향)
Sensor 5	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	236	0.236	1.44	-	전단변위 (5호분 동서방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	121	0.121	0.74	+	직각변위 (5호분 남북방향)
Sensor 6	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	159	0.159	0.97	-	전단변위 (5호분 남북방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	1042	1.042	6.34	-	직각변위 (5호분 동서방향)
Sensor 7	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	411	0.411	2.5	-	전단변위 (5호분 동서방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	96	0.096	0.58	-	직각변위 (5호분 남북방향)
Sensor 8	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	112	0.112	0.68	-	전단변위 (5호분 남북방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	424	0.424	2.58	+	직각변위 (5호분 동서방향)
Sensor 9	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	1253	1.253	7.62	+	직각변위 (6호분 동서방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	36	0.036	0.22	-	전단변위 (6호분 남북방향)
Sensor 10	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	199	0.199	1.21	-	전단변위 (6호분 동서방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	318	0.318	1.94	+	직각변위 (6호분 남북방향)
Sensor 11	X 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	268	0.268	1.63	+	전단변위 (6호분 남북방향)
	Y 방향	97.2.14 - 97.4.14(60일)	1017	1.017	6.19	-	직각변위 (6호분 동서방향)

※ 1° = 17453μradians
- 방향 : 벽체의 고분내측으로 변위 발생(직각변위)
+ 방향 : 벽체의 고분외측으로 변위 발생(직각변위)

Table 2. Comparison of wall movement during the periods of sunny weather and rainy weather.

Sensor		관측기간	변화량			방향	비 고
			μrad	mm/m	년간변화량		
Sensor 1	X 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	205	0.205	10.7	+	직각변위 (7호분 동서방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	132	0.132	8.03	+	
		97.8.1 ~ 97.8.11(11일)	71	0.071	2.4	-	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	2	0.002	0.1	+	
	Y 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	79	0.079	4.12	-	전단변위 (7호분 남북방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	3	0.003	0.2	-	
		97.8.1 ~ 97.8.11(11일)	19	0.019	0.63	+	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	4	0.004	0.21	+	
Sensor 2	X 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	201	0.201	10.5	+	직각변위 (7호분 동서방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	149	0.149	9.1	+	
		97.8.1 ~ 97.8.11(11일)	132	0.132	4.4	-	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	51	0.051	2.7	-	
	Y 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	118	0.118	6.2	-	전단변위 (7호분 남북방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	22	0.022	1.4	+	
		97.8.1 ~ 97.8.11(11일)	20	0.020	0.66	+	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	10	0.01	0.5	+	
Sensor 3	X 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	249	0.249	13	-	직각변위 (7호분 남북방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	2	0.002	0.1	+	
		97.8.1 ~ 97.8.11(11일)	177	0.177	5.9	+	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	62	0.062	3.2	+	
	Y 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	5	0.005	0.3	-	전단변위 (7호분 동서방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	89	0.089	5.1	+	
		97.8.1 ~ 97.8.11(11일)	99	0.099	3.1	+	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	32	0.032	1.7	+	
Sensor 4	X 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	199	0.199	10.4	-	전단변위 (7호분 동서방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	42	0.042	2.6	+	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	7	0.007	0.4	-	
	Y 방향	97.7.1 ~ 97.7.7(7일)	70	0.07	3.7	-	직각변위 (7호분 남북방향)
		97.7.11 ~ 97.7.16(6일)	181	0.181	11	-	
		97.8.20 ~ 97.8.26(7일)	2	0.002	0.1	+	

※ 97.7. 1 - 97.7. 7 : 비교적 비가 많이 온 기간　　97.8. 1 - 97.8.11 : "
97.7.11 - 97.7.16 : "　　97.8.20 - 97.8.26 : 전형적인 맑은 날씨의 기간

릉 현실 바닥보다 30~40cm 높게 유지되어 왕릉주위의 지반을 포화시키는 것으로 관측되었다. 2호공의 지하수위는 우기인 97년 7월 이후 8월 31일까지 지하수위가 지표하 7~9m까지 유지되어 약 2개월간 지하수위가 시추공에서 관측되었다. 한편, 원지반인 3호공의 경우 집중호우시에는 지하수위가 관측되지만 대부분의 기간동안 지하수위가 관측되지 않는다(Fig. 6). 이러한 현상은 무령왕릉 축조지반이 원지반보다 배수가 잘 되지 않음을 의미하며, 이러한 배수불량은 무령왕릉의 구조안전에 영향을 미치는 것으로 분석되고 있다.

또한 봉분내부의 토양층구조에 대한 GPR (Ground Penetration Radar) 영상단면을 분석한 결과 5호분 상부와 무령왕릉 연도상부의 누수방지층이 심하게 균열되어 있음을 발견하였다(서만철, 1997). 이 두곳은 고분내부로 직접누수가 발생하는 곳이다. 비교적 비가 많이 내리는 기간에 직접누수와 지하수형태로 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 분석 결과 지반에 Smecite 광물이 다량 발견되는 바, 빗물유입으로 인하여 Smecite 광물의 부피팽창으로 인하여 지반이 약화될 가능성이 매우 높다.

이처럼 기상조건이 다른 주간 틸트거동을 비교해 보면, 강우량이 많은 기간에는 벽체가 빠르고 큰 틸팅을 하고 전형적인 맑은 날씨가 계속된 기간에는 아주 미약하게 거동하는 것을 볼 수 있다. 이상에서 볼 수 있는 바와 같이 벽체는 시간이 지남에 따라 서서히 거동을 하는 것이 아니라 우기에는 급격히 거동을 하고, 건기에는 미약하게 거동을 하기 때문에 구조안전에 매우 심각한 문제를 초래한다.

온도의 영향

틸트와 온도와의 상관관계를 보다 정량적으로 파악할 목적으로 3월 25일부터 5월 28일까지 수집된 무령왕릉 연도 입구벽의 벽체거동자료를 온도시계열을 틸트의 남-북방향 성분과 함께 나타내었다. Fig. 7은 연도입구 벽체의 온도에 따른 벽체이력곡선을 나타내고 있다.

연도입구 벽체의 온도변화에 따른 거동특성을 살펴보면 고분내에 설치된 제습기의 작동으로 온도가 20℃에서 33℃로 급격한 상승이 일어날 때 벽체는 전실쪽(남)으로 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 거동 비율이 6 mm/m/yr이다.

상승했던 온도가 다시 하강되면 벽체는 현실쪽(북)으로 미약한 거동을 보일 뿐 온도가 상승하기 전의 상태로는 돌아가지 않는다. 온도가 24℃ (122 μrad)에서 33℃ (656 μrad)까지 상승하였다가 다시 24℃(645 μrad)로 하강할 때의 벽체거동을 비교해 보면 상승하기전의 24℃에서는 122 μrad 인데 온도가 상승했다가 다시 하강했을 때의 tilt는 645 μrad

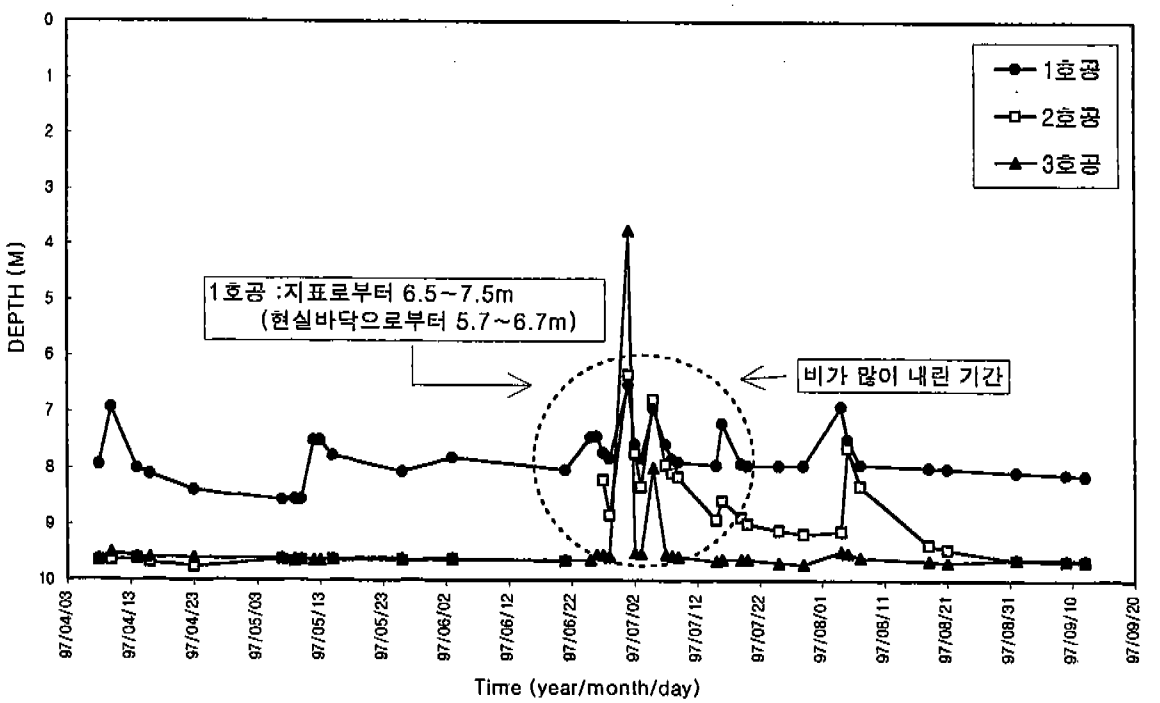


Fig. 6. Groundwater level in boreholes. Depths were measured from the surface of each wall.

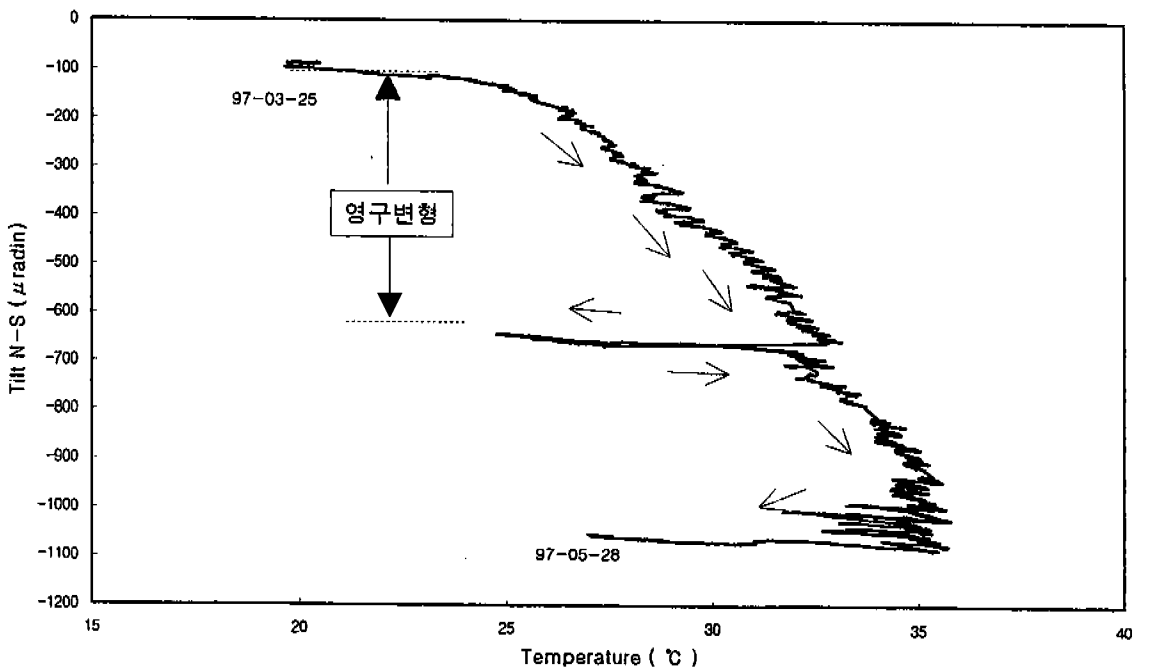


Fig. 7. Hysteresis curve of movement of the frontal wall of the Muryong royal tomb with temperature variation.

으로써 523μrad의 잔여변형을 발생시켜 영구변형(permanent deformation)으로 남게 된다. 다시 온도가 상승하면 온도에 따른 벽체거동은 이와 같은 이력현상(hysteresis)을 또다시 반복하고 있다. 이는 벽체의 온도에 대한 거동 특성이거나 또는 온도에 의한 변형이 구조전체의 토압에 의한 운동방향으로 발생하여 원상태로 회복되지 않았을 가능성을 시사한다. 이 523μrad에서 온도가 일정하게 유지될 때의 벽체거동량인 46μrad을 제거하면 477μrad가 나오는데 이는 순수 온도상승에 의한 잔류벽체거동량을 나타낸다. 온도상승에 따른 이런 변형이 TMS의 sensor 자체의 거동이라고 본다면 온도가 다시 하강하면 다시 제자리로 돌아와야 하는데 그렇지 않다는 것은 계측된 잔류거동량이 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.

결 론

장기간의 경사도변화계측을 통한 송산리 고분군의 5호분, 6호분 및 무령왕릉에 대한 벽체거동 특성분석결과는 다음과 같다.

1. 무령왕릉 벽체의 거동에 있어서 최대변화는 연도입구의 호벽의 직각성분이 2.3㎜/m/yr로써 가장 심하며, 현실동측벽의 거동 또한 1.523㎜/m/yr로써 심한 편이다. 우기에는 그 변위가 약 2배에 달하는 것으로 판단되어 고분군 주위의 지반이 침투수에 노출되는 우기에는 고분의 구조안전에 심각한 문제가 있는 것으로 판단된다. 무령왕릉의 벽체거동의 현저한 반응은 온도변화와 강수에 기인되는 것으로 판단된다.
2. 5호분은 전체적으로 벽체의 전후방향이 벽체의 전단방향 변위보다 크게 나타난다. 또한 고분내의 온도가 일정하게 유지되고 있기 때문에 틸트성분의 급격한 불연속은 없고 일정한 방향으로 계속적인 미약한 변동을 보이고 있다.
3. 6호분의 벽체거동 계측은 건기의 거동수치가 다른 고분의 우기시의 거동수치를 훨씬 초과하여 고분의 안전성에 있어서 심각한 상태인 것으로 판단된다.
4. 기상조건이 서로 다른 기간 동안의 벽체거동을 파악한 결과, 강우량이 많은 기간 동안의 벽체거동이 맑은 날씨의 기간보다 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 이는 비가 많이 내린 기간에 직접누수와 지하수형태로 유입된 침투수가 고분군 주위의 지반의 함수비를 증가시켜 지반의 지지력을 약화시키기 때문인 것으로 해석된다. 즉, 지하수 유출에 의한 토립자의 유출에 따른 변형과 지하수 충진에 의한 Pore pressure의 증가에 따른 heaving 현상을 초래하기 때문이다.
5. 고분벽체의 거동비율은 온도변화 및 강우현상과 직접적인 연관성을 보인다. 온도가 급격한 변화를 일으킬 경우 잔여변형을 발생시켜 영구변형으로 남는 이력현상을 갖는 것으로 판단되므로 고분내의 온도를 항온상태로 유지할 필요가 있다. 또한, 강우현상에 의한 지하수위의 변화는 벽체거동과 직접적인 관계가 있는 것으로 밝혀져 우기에 빗물이 침투되지 않도록 차수시설과 배수시설이 시급한 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 문화재 보존복구대책의 일환으로 수행된 송산리 고분군의 현황과 보존대책 연구의 일부로서 문화재 관리국, 충청남도 및 충남 공주시의 관계관 여러분들의 행정·재정적 지원에 감사드린다. 특히 Tiltmeter system의 설치에 있어서 기술적 지원을 아끼지 않은 (주)바투 엔지니어링의 최상진 사장 및 직원 여러분께도 감사를 드리며 자료의 정리 및 지하수위 관측 등에 많은 도움을 준 공주대학교 지질환경과학과 신현완, 김성배, 류제라, 유영희 대학원생들에게도 감사를 드린다.

참 고 문 헌

김유선, 1997, 백제 무령왕릉 발굴직후의 보존과학 조사연구 개황, 한국과학재단 문화재안전과학연구회 학술심포지움, 백제 무령왕릉의 보존대

책, 3-17.
문화재관리국, 1973, 무령왕릉 발굴보고서, 248p.
서만철, 1997, 송산리 고분군의 현황과 보존대책, 공주대학교 기초과학연구소, 충청남도 공주시, 467p.
서만철, 이남석, 조기호, 1995, 공주지역 백제고분조사, 공주대학교 박물관, 353p.
서만철, 정계옥, 김동현, 1997, 송산리 고분군의 지구물리학적 조사를 통한 고분축조방법고찰, 보존과학회지, 6권, 61-70.
윤무병, 1991, 무령왕릉의 구조, 공주대학교 백제문화연구소 간행, 백제무령왕릉, 113-129.
이상규, 1993, 공학적 활용을 위한 천부지반 틸트 모니터링, 지질공학, 3권, 279-293.
이태녕, 1991, 保存科學的 側面에서 본 武寧王陵, 공주대학교 백제문화연구소 간행, 백제문화 제21집, 177-196.
천병식, 오재웅, 1993, 지반진동 영향과 대책, 건설연구사, 83-102.
Agnew, D. C., 1986, Strainmeters and tiltmeters : Review of Geophysics, Vol. 24, 579-624.
Hobbs, B. E., Means, W. D. and Williams, P. F. 1976, An outline of structural geology : John Wiley & Sons, INC., New York.
Kumpel, H. J., Peters, J. A. and Bower, D. R. 1988, Nontidal tilt and water table variations in a seismically active region in Quebec, Canada, Tectonophysics, Vol. 152, 253-265.

서만철, 박은주
공주대학교 지질환경과학과
충남 공주시 신관동
314-701
TEL : (0416) 50-8512
e-mail : mcsnh@knu.kongju.ac.kr