

무령왕릉보존에 있어서의 지질공학적 고찰

서만철, 최석원, 구민호
공주대학교 지질환경과학과
충남 공주시 신관동 182, 314-701

요 약

무령왕릉의 보존대책을 수립하기 위하여 누수 현상, 고분구조의 벽체거동 상황 및 구조안전 점검, 고분 내에 서식하는 조류의 제거, 고분내 습기 및 결로현상 제거를 위한 공기조화시설 등을 포함하는 종합 정밀조사를 1996년 5월 1일 부터 1997년 4월 30일 까지 1년간 수행하였다. 이러한 연구를 수행하기 위하여 기초 지반에 대한 정밀측량, 고분 내외부의 년중 온습도 모니터링, 지반의 내부물성 파악을 위한 지구물리 탐사, 시추 자료에 대한 각종 물성실험, 지반의 투수 계수 측정 및 지구화학적 분석을 실시하였다.

고분 내외부에 대한 정밀측량 결과 봉분 중심이 현실 중심보다 북동쪽으로 5 m 이격되어 있다. 무령왕릉의 경우는 발굴 당시에도 유사한 분포를 하였으나, 이로 인하여 불균형적인 토압을 발생시키는 원인이 되고 있다. 벽돌깨짐 상황 조사결과 무령왕릉의 조사 대상 벽돌 6025장중 1972년에는 435장 파손되었던 것이 1996년 조사결과 1072장이 파손된 것으로 밝혀져 파손율이 2.5배로 증가하였다. 6호분의 경우는 이보다 더 심하여 벽돌 파손율이 2.9배로 증가하고 있다. 1972년 상황은 약 1450년간 진행된 것이고 1996년의 상황은 불과 24년간 진행된 것임을 감안할 때 고분이 발굴된 이후 벽돌의 균열은 상당한 가속도로 진행되어 온 것이 사실이며 이대로 진행된다면 더욱 더 가속화될 것으로 판단된다.

고분벽체의 거동상태를 측정한 결과 무령왕릉 동측벽의 경우 우기와 건기에 각각 2.95 mm/myr 및 1.52 mm/myr의 거동을 보여 우기에 지하수 유입에 의한 지반의 약화로 인하여 건기보다 2배 정도 거동하는 양상을 보인다. 한편, 연도 입구의 호벽은 건기에 전실쪽으로 0.43 mm/myr, 연도 쪽으로 2.05 mm/myr의 거동을 보여 무령왕릉에서는 가장 심한 거동을 보이고 있다. 6호분의 거동현황은 건기에만 측정된 바, 현실의 동측벽과 서측벽이 각각 벽체 뒤쪽으로 7.44 mm/myr, 현실 안쪽으로 3.61 mm/myr의 거동을 보여 조사대상 5호분, 6호분, 7호분 중 가장 심한 거동을 보이고 있다. 이는 고분 벽돌의 깨짐이 6호분이 가장 심하다는 사실과 무관하지 않은 것으로 판단된다.

봉분내부의 토양층구조에 대한 지오레이다 영상단면을 분석한 결과 무령왕릉 연도상부의 누수방지층이 심하게 균열되어 있음을 발견하였다. 이 곳은 고분내부로 직접누수가 발생하는 곳이

다. 직접누수와 지하수 형태로 유입된 침투수는 고분군 주위의 지반의 함수비를 증가시켜 지반의 지지력을 약화시키고 또한 고분내로 서서히 유입되어 고분내부의 습도를 100%로 유지시키는 주된 원인이다. 이러한 높은 습도는 고분내의 남조류의 번식을 가져 왔으며 남조류의 번식은 현재 6호분이 가장 심각하고 7호분이 우려되는 수준이며 5호분은 문제가 없는 것으로 판단된다.

이와 같이 고분군의 발굴후 인위적인 환경변화와 지속적인 강우침투 및 배수 불량에 의한 영향은 고분군의 안정성에 상당한 위협을 초래하였으며, 현 상태는 각 고분에 대한 보강이 불가피한 것으로 판단된다. 고분 벽돌의 깨짐, 고분 벽체의 거동, 조류의 서식 등을 포함하여 송산리 고분군에서 발생되고 있는 보존상의 제반 문제점들은 일차적으로 누수 및 침투수에 의한 결과이다. 그러므로 무엇보다도 고분군 내부 및 고분 주변으로의 강우 및 지하수 침투를 막는 차수 대책이 시급한 것으로 판단된다. 또한 이미 발생한 변위가 더 이상 진행되지 않도록 봉분의 하중을 경감하고 토압의 균형을 이루는 보강대책이 시급한 실정이다.

고분군의 보존대책으로서는 고분의 구조안전에 관하여 근본적인 구조변경이 불가피한 직접보강대책보다 간접적인 보강대책이 바람직한 것으로 판단된다. 간접적 보강대책으로서는 현 봉분규모의 축소, 불균등토압의 조정, 강우침투 방지를 위한 최종복토시스템, 유도배수구의 설치 및 능선 상부로부터의 지하수 차단시설을 포함한다. 이러한 차수대책은 고분군의 제문제를 해결하는 가장 근본적인 대책이라 할 수 있다.

고분내 결로현상 및 습기 제거를 위하여 향온향습장치를 전실에 설치하고 덕트를 통하여 고분내 현실로 순환시키는 방법을 제안하며 외부 온도의 영향을 덜 받게 하기 위하여 전실상부 토양을 현재보다 두껍게 하고 전실의 천정마감재를 열전도도가 낮은 목재로 교체하며 출입문의 이동 등을 제안하였다.

금번 조사 연구를 통하여 얻어진 각종 보수 및 보존대책은 고분구조 자체에 가능한 한 최소의 변화를 주면서 가장 시급한 문제점부터 해결하도록 제시되었다. 설계 및 시공 단계에서는 보수의 경중을 가려 순서에 입각하여 이루어져야만 하며 설계 및 시공 단계에서 고분의 구조안전에 영향을 주지 않도록 각별한 주의가 요망된다.

끝으로, 상기의 보수대책이 실시된 후 이에 대한 평가 및 향후의 영구 보존을 위한 벽체경사 계측, 함수비 및 지하수위 계측, 온습도 측정 등을 포함하는 사후계측시스템은 필수적이라 할 수 있다. 각종 계측자료를 이용한 장기적이고도 세심한 분석을 통하여 완벽한 보존 관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

The detail survey on the Songsanri tomb site including the Muryong royal tomb was carried out during the period from May 1, 1996 to April 30, 1997. A quantitative analysis was tried to find changes of tomb itself since the excavation. Main subjects of the survey are to find out the cause of infiltration of rain water and groundwater into the tomb and the tomb site, monitoring of the movement of tomb structure and safety, removal method of the algae inside the tomb, and air controlling system to solve high humidity condition and dew inside the tomb. For these purposes, detail survey inside and outside the tombs using a electronic distance meter and small airplane, monitoring of temperature and humidity, geophysical exploration including electrical resistivity, geomagnetic, gravity and georadar methods, drilling, measurmnt of physical and chemical properties of drill core and measurement of groundwater permeability were conducted.

We found that the center of the subsurface tomb and the center of soil mound on ground are different 4.5 meter and 5 meter for the 5th tomb and 7th tomb, respectively. The fact has caused unequal stress on the tomb structure. In the 7th tomb (the Muryong royal tomb), 435 bricks were broken out of 6025 bricks in 1972, but 1072 bricks are broken in 1996. The break rate had been increased about 250% for just 24 years. The break rate increased about 290% in the 6th tomb. The situation in 1996 is the result for just 24 years while the situation in 1972 was the result for about 1450 years. Status of breaking of bricks represents that a severe problem is undergoing.

The eastern wall of the Muryong royal tomb is moving toward inside the tomb with the rate of 2.95 mm/myr in rainy season and 1.52 mm/myr in dry season. The frontal wall shows biggest movement in the 7th tomb having a rate of 2.05 mm/myr toward the passage way. The 6th tomb shows biggest movement among the three tombs having the rate of 7.44 mm/myr and 3.61 mm/myr toward east for the eastern wall and western wall, respectively. This fact seems to have some relationship with the high break rate of bricks in the 6th tomb.

Georadar section of the shallow soil layer represents several faults in the top soil layer of the 5th tomb and 7th tomb. Rainwater flew through faults into the tomb and nearby ground and high water content in nearby ground resulted in low resistance and high humidity inside tombs. High humidity inside tomb made a good condition for algae living with high temperature and moderate light source. The 6th tomb is most severe situation and the 7th tomb is the second in terms of algae living.

Artificial change of the tomb environment since the excavation, infiltration of rain water and groundwater into the tombsite and bad drainage system had resulted in dangerous status for the tomb structure. Main cause for many problems including breaking of bricks, movement of tomb walls and algae living is infiltration of rainwater and groundwater into the tomb site. Therefore, protection of the tomb site from high water content should be carried out at first. Waterproofing method includes a cover system over the tombsite using geotextile, clay layer and geomembrane

and a deep trench which is 2 meter down to the base of the 5th tomb at the north of the tomb site. Decrease and balancing of soil weight above the tomb are also needed for the safety of tomb structures.

For the algae living inside tombs, we recommend to spray K101 which developed in this study on the surface of walls and then, exposure to ultraviolet light sources for 24 hours. Air controlling system should be changed to a constant temperature and humidity system for the 6th tomb and the 7th tomb. It seems to much better to place the system at frontal room and to circulate cold air inside tombs to solve dew problem.

Above mentioned preservation methods are suggested to give least changes to tomb site and to solve the most fundamental problems. Repairing should be planned in order and some special cares are needed for the safety of tombs in repairing work.

Finally, a monitoring system measuring tilting of tomb walls, water content, groundwater level, temperature and humidity is required to monitor and to evaluate the repairing work.

1. 서 언

무령왕릉은 백제 제 25대 무령왕 및 왕비합장릉으로서 삼국사기 및 동국여지승람의 사료를 확인시킨 유일의 중요 문화유적이다. 조상의 찬란한 전통자산을 유지 계승하여 민족의 자부심을 고취시키고 완벽하게 보존하여 후손에게 물려주는 것은 오늘을 사는 우리의 의무이기도 하다. 무령왕릉은 충청남도 공주시 금성동에 소재하는 7기의 고분으로 구성되는 송산리고분군의 하나로 1971년에 6호분의 배수공사중 우연히 발견되었다.

본 연구는 충청남도 공주시 금성동 소재 송산리고분군중 5호분, 6호분 및 7호분(무령왕릉)의 보존관리상의 제반문제점에 관한 종합정밀조사를 통하여 그 원인을 규명하고 보존관리대책을 강구하여 그에 따른 보수지침을 마련하는데 연구의 목적을 두었다. 1995년 여름의 공주지방에 내린 심한 강우현상으로 인하여 송산리고분군의 5호분에 심한 누수현상이 발생하였고 무령왕릉의 연도천정부 등에서 누수현상이 있었다. 또한 그해 겨울에는 무령왕릉 연도 천정부의 벽돌 3개가 최대 7 cm 하향이동하여 무령왕릉의 구조안전에 관한 심각성을 인식하게 되었다. 그에 따라 1996년 1월중에 문화재관리국 주도하에 각계 전문가로 구성된 현지조사단이 현지를 방문하여 검토한 결과 종합적이고도 정밀한 장기조사연구가 필요한 것으로 결론지어 졌다.

송산리고분군에 대한 종합 정밀조사는 1996년 5월 1일 부터 1997년 4월 30일 까지 1년간 수행되었다. 본 조사에서는 무령왕릉을 비롯한 6호분의 발굴당시와 현황을 대비분석하여 발굴이후의 변화에 대한 정량적 분석을 실시하였으며, 5호분 및 무령왕릉의 누수원인을 규명하고, 고분구조

의 벽체거동 상황 및 구조안전 점검, 고분내에 서식하는 藻類의 제거 및 고분내 습기 및 결로현상 제거를 위한 공기조화시설 등의 연구에 역점을 두었다. 이러한 연구를 수행하기 위하여 기초지반에 대한 정확한 정보를 얻기위하여 광파거리측량 및 항공측량을 이용하여 5, 6, 호분 및 무령왕릉 인근에 대한 정밀측량을 실시하였으며, 고분 내외부의 연중 온습도 모니터링, 지반의 내부물성과약을 위하여 지구물리탐사, 시추자료에 대한 각종 물성실험, 지반의 투수계수 측정 및 지구화학적 분석을 실시하였다. 연구추진체계는 Table 1에 나타내었다.

2. 보존과학적 측면에서 본 현황

1) 무령왕릉의 벽돌깨짐 현상

송산리 고분군의 전축분인 6호분과 무령왕릉에 대하여 묘실내부의 벽돌깨짐을 조사한 결과를 1971년 발굴후 1972년에 확인된 상황과 비교하였다. 무령왕릉의 벽돌깨짐 상황을 벽면별로 보면 1972년 깨짐상황에 비하여 남북벽은 약 170%, 동벽은 110% 정도, 그리고 서벽은 약 170%, 그리고 연도는 서쪽의 경우 200% 이상의 벽돌 깨짐이 증가하였다. 또한 6호 전축분의 벽돌 균열은 보다 심각하게 이루어져 1972년 이후 약 25년의 기간에 깨져 있는 벽돌이 2-3배가량 증가되었음을 알 수 있는데 특히 동서벽의 경우는 약 250%가 늘어난 것으로 집계된다. 1972년의 현황이 약 1450여년간 진행된 것이고, 1996년의 확인 결과가 1972년 조사시점으로부터 겨우 25년간 경과되었을 뿐이라는 사실을 고려하면 벽돌의 균열 진행은 상당한 가속도로 이루어졌음이 쉽게 짐작된다. 벽돌깨짐은 벽면의 누어쌓기와 세워쌓기의 벽돌중에서 묘실내부에서는 세워쌓기한 벽돌에서는 확인되지 않고, 누어쌓기한 벽돌에서만 이루어져 있으며, 1972년 이후 진행된 벽돌의 깨짐은 주로 벽면의 하단에서 집중적으로 진행되어 있음을 알 수 있다.

무령왕릉보다 6호분의 벽돌파손이 월등히 많이 진행된 바, 6호분의 경우는 1932-1933년에 조사·노출되어 무령왕릉보다 노출기간이 오래되었다는 사실을 고려할 때, 무령왕릉도 이대로 방치할 경우 벽돌파손이 가속화 될 것으로 판단된다.

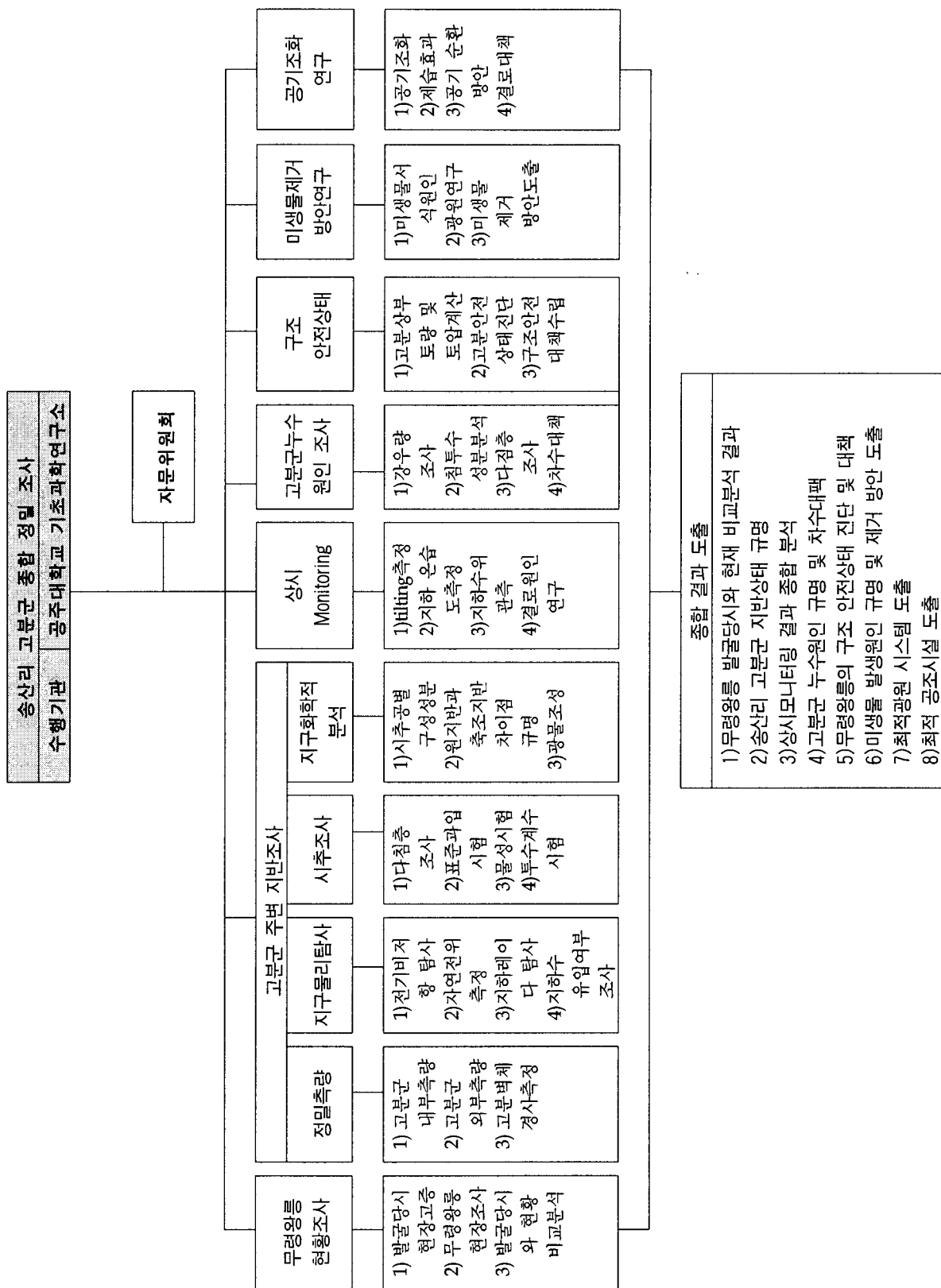


Table 1. 연구추진체계

2) 무령왕릉 주변의 지반조사

(1) 정밀측량

3차원 측위 시스템과 공중 및 지상 사진 측량을 이용하여 송산리 고분군의 외측 및 내측에 대한 정밀 3차원 실측을 실시하고, 실측한 3차원 수치 자료로부터 다양한 공간 분석을 수행하여 고분의 내·외측에 대한 정확한 수치 자료 및 도면을 산출한 결과 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

- 3차원 측위시스템을 이용하여 고분군 내·외측을 동일 좌표계로 표현함으로써 고분 군에 대한 3차원 모델링이 가능하였으며, 고분 내측과 외측 정점간 편위량, 고분간 상대적 위치 및 높이등을 정확히 산출할 수 있었다.
- 구축된 3차원 수치자료로부터 5호분은 7개 방향에 대한 단면도를, 6호분은 8개 방향에 대한 단면도, 7호분의 7개 방향에 대한 단면도를 각각 산출함으로써, 단면해석에 의한 고분 내의 체적 및 고분 상부 표토에 대한 체적을 산출할 수 있었다.
- 공중사진측량기법을 이용하여 정확하고 신속한 고분군 외측에 대한 수치지형자료를 획득할 수 있었으며, 지상사진측량기법을 이용하여 벽면에 대한 정밀도화를 수행한 결과 효율적인 수치자료 획득이 가능하였다.

본 연구결과 획득한 수치자료는 고분군에 대한 조사, 보존 및 복원을 위한 기초적 자료로서 다양하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

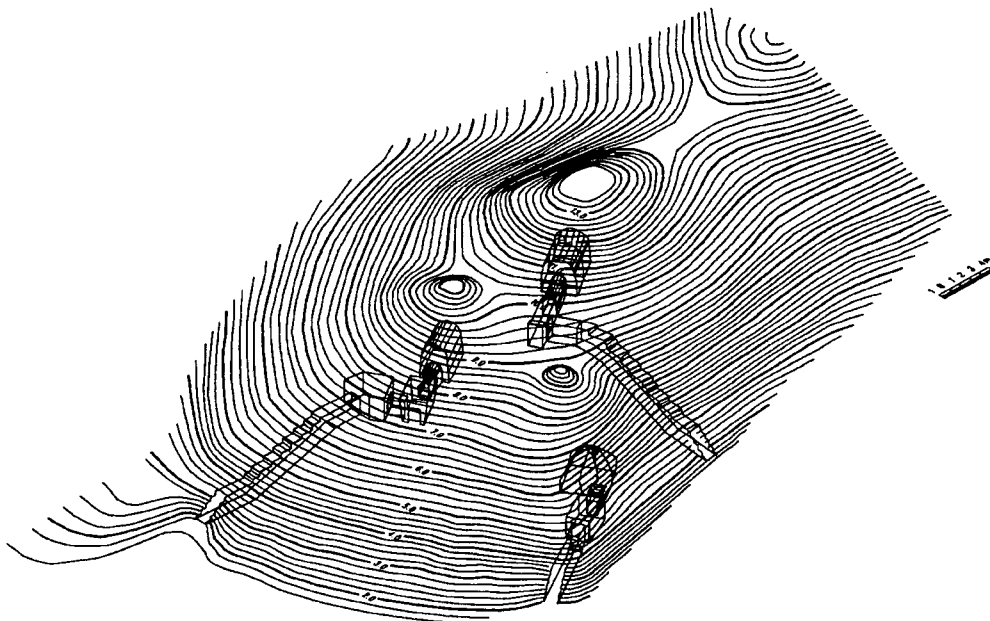


Fig. 1. 송산리 고분군 지형과 고분위치

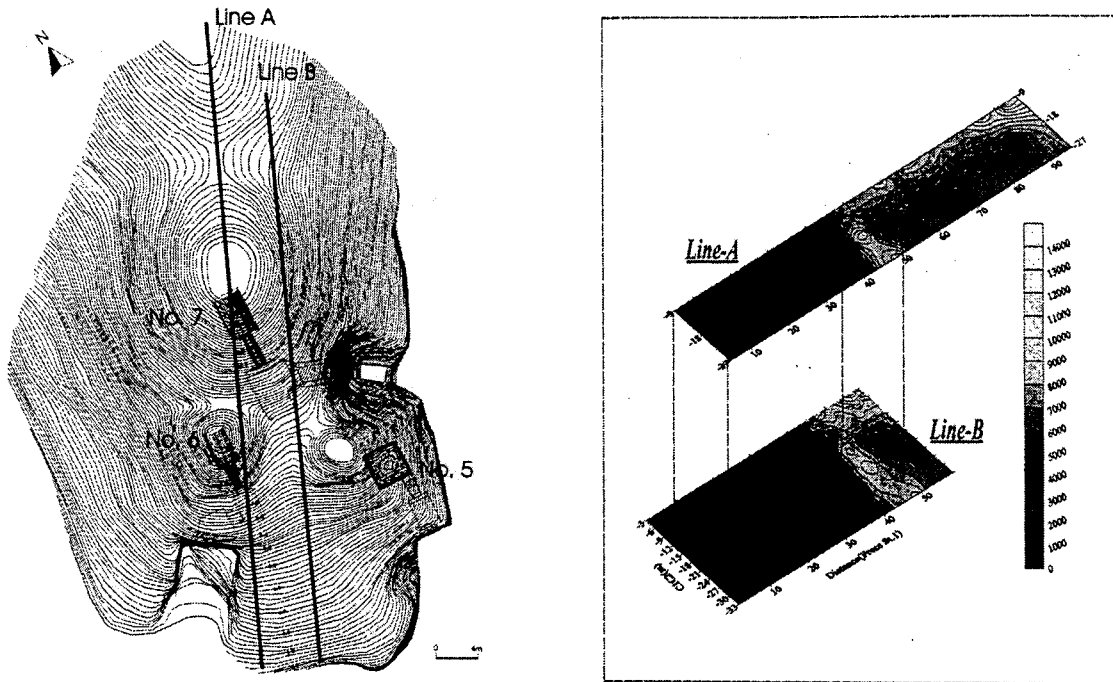


Fig. 2 송산리 고분군 전기비저항 탐사 축선도 및 전기비저항 분포도

(2) 지구물리탐사

송산리 고분군의 5호분, 6호분 및 7호분(무령왕릉) 인근지역에 대한 정밀측량, 자력측정, 중력측정, 자연전위 및 비저항측정이 실시되었으며 또한 각 고분을 횡단 또는 종단하는 축선을 설정하여 지하레이다탐사를 실시하였다.

자력이상자료는 지하 및 지표에 설치된 철제시설물의 위치를 정확히 파악해준다. 이는 송산리 고분군의 경우 이미 발굴되고 각종 보호시설과 관람시설을 위한 지중시설물에 의한 자력효과이다. 실제의 미확인 백제고분의 탐사에 있어서 자력이상의 분포가 명확하게 나타날지는 미지수다. 왜냐하면 백제 고분의 경우 철제물체가 고분내에 별로없고, 또한 존재한다해도 이미 부식되어 자기장을 띄기 어렵기 때문이다. 그러나 고분자체에 화장을 시행했던 형태의 고분이 있다면 자력탐사에 의해 쉽게 확인 될 수 있으리라 생각된다.

중력이상자료는 지하에 존재하는 공동의 효과를 반영하는 것으로 확인되었으며 지하에 존재하는 배수공간 및 고분의 현실 및 연도 등의 위치와 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다.

비저항분포자료는 백제시대 고분축조당시의 절개지 경계부를 명확하게 보여주고 있다. 기존 지반의 경우 비저항의 크기가 표층부의 경우 1,000 - 1,500 ohm-m의 범위를 보이는 반면 고분축조부지의 경우 200 ohm-m이하의 저비저항치를 보이고 있다.

비저항의 분포로 확인된 기존 지반의 지역에서는 자연전위 값도 매우 낮다. 즉 자연전위의 분포로 부터도 기존지반과 절개부분을 확연히 구분할 수 있는데, 기존 지반의 경우 0 ± 3 mv/m의 매우 낮은 전위차를 보이고 있는 반면 고분축조부지의 경우 $-20 - 30$ mv/m의 상대적으로 월등히 높은 전위차를 보이고 있다. 이는 기존지반의 경우 상대적으로 높은 밀도, 낮은 순분함량등으로 인하여 높은 비저항치를 가지므로 자연전류가 매우 미약하게 흐르는 반면, 고분축조부지의 고분축조후 흙을 채운경우는 밀도가 낮고, 수분함량이 상대적으로 많은 토양이므로 자연전류가 많이 흐를 수 있기 때문으로 해석된다.

전기비저항 및 자연전위분포로 볼 때 고분축조를 위하여 절개했던 부분이 남북방향으로 약 35 m 정도이었음을 알 수 있다. 비저항 및 자연전위등으로부터 원래의 지반과 고분축조를 위해 굴착한 부분을 정확히 구분할 수 있다는 사실로 부터 과거 백제시대 고분축조의 방법에 관하여 추정을 할 수 있을 것으로 사료된다. 두 부분의 지반의 매질이 확연히 다르다는 것은 고분축조가 동굴을 파서 그 내부에 축조했다기 보다는 전체 축조부지를 절개하여 평탄화한 후 모형을 만들어 축조하고 그 후에 다시 파낸 암석부스러기 및 흙을 채워 원래 지형을 복원하였을 것으로 해석된다. Georadar 탐사결과 5호분 현실 중앙의 동남쪽에 누수방지층이 심하게 파손되어 있는 것으로 나타났다. 이들 파쇄대를 따라 강우가 직접 현실 내부로 누수되는 것으로 판단된다. 또한 7호분의 연도 천정부와 6호분의 현실 천정부에서도 누수방지층이 파손되어 있는 것으로 판단된다.

(3) 고분군주변의 지반 시추조사

- 地形 및 地質

本 調査地域은 행정구역상 충남 공주시 금성동 140-1번지내로 송산리 고분군(무령왕릉)에 해당되며 各 土質 및 試錐調査 地點에 대한 標高는 基準標高 $GL \pm 0.0m$ 를 基準하여 다음과 같다.

地形은 매우 완만한 구릉성 南山斜面을 이루고 있으며 地質은 時代未詳의 반상암쇄편마상화강암과 先캠브리아紀의 혼성편마암을 不整合으로 피복한 역암이 發達分布하고 있다.

- 地層各論

- 盛土層 : 古墳 發掘後 復原과정에서 形成된 最上部 피복층으로 입도는 통일분류법상 점토질모래(SC)~실트질모래(SM)으로 構成. 층후는 0.2~3.0m. 갈색 습윤한 狀態. N치는 3/30~26/30으로 매우 느슨하거나 보통조밀한 상대밀도.
- 다짐층 : 과거 고분형성과정에서 형성된 다짐층으로 추정 입도는 실트질모래, 각력암편등으로 구성된 SM~SW. 암편은 각력암, 집괴암, 응회암질 등의 화산쇄설성암편으로 構成. 岩構造의으로 볼 때 原地盤의 構造와 매우 유사하여 구분이 다소 곤란. 층후는 1.5~6.2m. 담회색, 갈색, 적갈색으로 다양하며 습윤한 상태임. N치는 50/26~50/10로 매우 조밀한 상대밀도.

지층 단면도

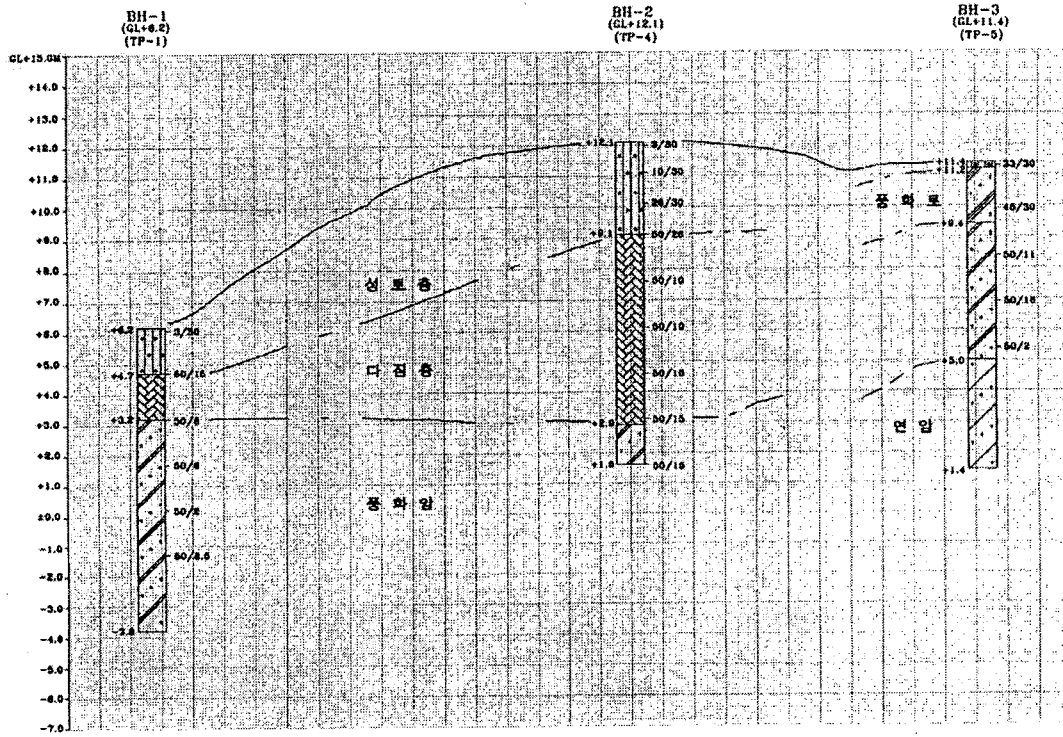


Fig. 3. 송산리 고분군 지반 단면도

- 風化土層 : 原地盤의 完全風化帶(Completely weathered : CW)層. 原岩組織이 觀察됨. 構成岩은 火山성 각력암, 집괴암, 응회암으로 구성. 입도는 SM~SW. 층후는 1.8m. 담회색, 갈색, 적갈색을 띠며 습윤한 狀態. N치는 48/30으로 조밀. 試錐時는 모두 실트질 모래입도로 分解되어 採取됨.
- 風化岩層 : 原地盤의 中間풍화대층(CW~HW)으로 原岩組織이 觀察됨. 構成岩은 風化土層과 同一하며 입도는 SM~SW에 해당됨. 風化土層과는 50/15~11를 基準하여 區分하며 층후는 4.4m이다. 색은 岩質에 따라 갈색, 담회색, 담회색, 담자색을 띠며 습윤한 狀態임. N치는 50/16~50/2로 매우 조밀한 상대밀도. 試錐時 실트질 모래로 分解되어 採取됨.
- 軟 岩 : 풍화정도는 中間정도 風化(Moderately weathered : MW). 構成岩은 風化土, 風化岩과 동일한 火山성쇄설암이며, 일부 구간은 암편코아로 採取됨. 코아회수율(TCR)은 10~35%로 저조하며 RQD=0으로 극히 불량.

地下水位 測定結果 및 現場透水試驗結果

현장투수시험은 성토/다짐층과 원지반과의 비교 또는 지반의 투수성을 파악하고자 각 시추

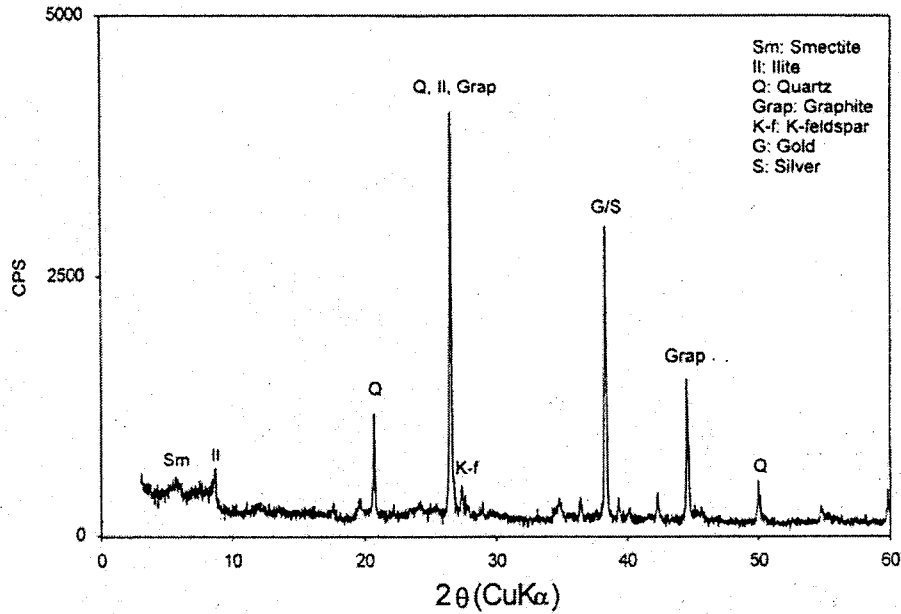


Fig. 4. 성토층 토양의 X선 회절도

공에서 현장투수시험을 실시하였다. 고분군이 위치하는 BH-1과 BH-2에서는 성토층, 다짐층 등의 영향으로 K값이 각각 $2.24 \times 10^5 \text{cm/sec}$, $2.68 \times 10^6 \text{cm/sec}$ 이고, BH-3의 원지반의 경우 K값은 $7.44 \times 10^7 \text{cm/sec}$ 로 나타났다.

(4) 지구화학적 분석

고분군 지역의 토양특성을 살펴보기 위하여 고분군 지역에서 3공을 시추하여 토양표품을 얻어 화학분석, X선 회절분석, SEM사진분석 등을 실시하였다. 그 결과 시추공 BH-1과 BH-2의 성토층에서만 스멕타이트가 산출되었고, 나머지 3공에서 산출되는 모든 층의 광물들은 석영, 흑연, 정장석, 금, 은 및 일라이트로 모두 같은 종류였다. 따라서 성토층의 토양을 어떻게 조성하였는지 검토할 필요가 있다. 스멕타이트와 함께 고분군 지역에 영향을 줄수 있는 특성을 가진 점토광물로는 일라이트가 있다. 이러한 점토광물은 저장도, 고민감성, 고압축성과 다양한 팽창성 때문에 중요구조물, 정밀도를 요하는 구조물, 배수로를 필요로하는 계획에서는 반드시 제외되어야 한다. 만약 이러한 토양을 사용하려면 특별한 물질이나 기술이 필요하므로 계획, 설계, 구조에 필요이상 의 일차경비를 들이며 작동이나 유지비 등의 이차경비에도 상당한 문제가 따른다.

고분군 지역의 팽창토양에 수분함량을 결정하는 요인은 식생, 지형, 배수로, 성토층 또는 다짐층의 질과 함께 장마기가 있는 우리나라는 연중 고른 강수를 보이는 지역보다 팽창토양문제를 더 야기시킨다. 따라서 이 지역 토양의 팽창과 수축을 조절할 수 있는 기초를 하고 지하배수로,

빗물받이 등의 특별설계를하여 피해를 최소화하여야 한다. 또한 다짐층과 성토층등에서는 스펙타이트와 같은 점토광물은 제거되도록 설계하여야 할 것이다.

3) 무령왕릉의 벽체거동 모니터링

고분벽체의 거동상태를 계측한 결과 무령왕릉 현실 동측벽은 현실안쪽으로 우기와 건기에 각각 2.95 mm/myr, 1.52 mm/myr의 거동을 보여 지하수유입에 의한 지반의 약화로 인하여 건기보다 2배 정도 거동하는 양상을 보인다. 또한 서측벽 역시 현실 안쪽으로 1.42 - 0.17 mm/myr 거동한다. 한편 연도 입구의 호벽은 건기에 전실쪽으로 0.43 mm/myr, 연도쪽으로 2.05 mm/myr의 거동을 보여 무령왕릉에서는 가장 심한 거동을 보이고 있다.

6호분의 거동 현황은 건기에만 측정된 바, 현실의 동측벽과 서측벽이 각각 벽체뒤쪽으로 7.44 mm/myr, 현실 안쪽으로 3.61 mm/myr의 거동을 보여 조사대상 5호분, 6호분, 7호분 중 가장 심한 거동을 보이고 있다. 이는 고분 벽돌의 깨짐이 6호분이 가장 심하다는 사실과 무관하지 않은 것으로 판단된다. 5호분의 거동 또한 건기에만 측정되었으며, 2.27 - 5.49 mm/myr의 거동이

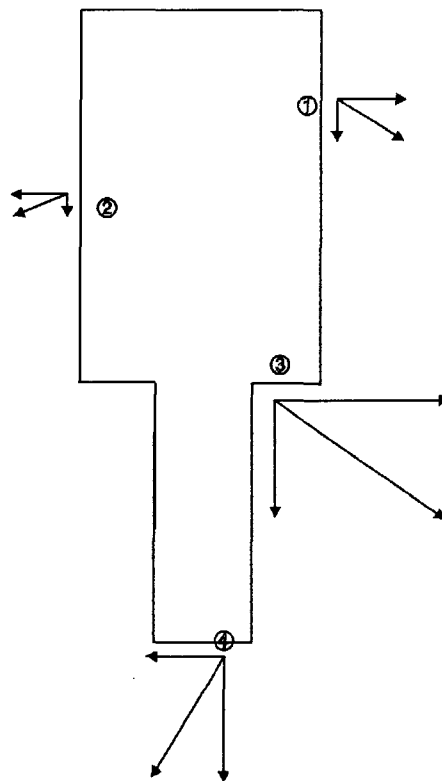


Fig. 5. 무령왕릉 벽체의 연간 운동 vector (96. 10. 1 - 97. 9. 30)

Table 2. 무령왕릉의 1년간 벽체거동계측 결과

	Normal	Shear	비고
sensor1	814.13	-525.48	
sensor2	660.83	151.10	
sensor3	1421.54	2099.24	
sensor4	-1442.6	-877.92	

서로 다른 방향으로 진행되고 있는 것으로 측정되었다.

1996년 10월 1일부터 1997년 9월 30일까지 1년간 무령왕릉의 벽체거동양상은 전반적으로 남쪽 방향성분이 우세하다(서만철,1997).

4) 무령왕릉의 누수현상

무령왕릉에서의 누수현상은 고분군 주위의 지반을 포화시켜 지반의 지지력을 약화시키고 또한 고분내로 서서히 유입되어 고분내부의 습도를 100%로 유지시키는 주된 원인이다. 무령왕릉의 누수현상은 크게 강우의 직접누수와 능선상부로부터의 지하수형태로의 유입을 들 수 있다. 직접누수 형태는 무령왕릉의 연도 천정부에서 발생하고 있다. 봉분내부의 토양층구조에 대한 지하레이다 영상단면을 분석한 결과 무령왕릉 연도상부의 누수방지층이 심하게 균열되어 있음을 발견하였다. 지하수유입 형태의 누수는 지형적인 분석 결과 가능성 있는 것으로 사료되나 직접 주수실험을 실시하여 확인한 결과 능선상부로부터의 지하수 유입은 발생하지 않았다.

직접누수현상을 확인하기 위하여 누수방지층 상부의 토양 약 80 cm를 제거한 후, 지하레이다 영상단면에서 확인된 누수방지층의 균열상태를 조사하였으며, 지하수 유입상황을 조사하기 위하여 무령왕릉 북쪽에 인공수조를 만들고 소방차를 동원하여 일 강우량 300 mm로 3일 동안 인공 주수실험을 실시하였다.

(1) 누수방지층 균열조사

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 강

회다짐층에서만 균열이 다수 발견되는 현상은 매우 특이하다. 특히 균열의 분포가 무령왕릉의 북서쪽과 남동쪽으로 집중적으로 발생하였으며, 무령왕릉의 현실과 연도를 연결하는 구조적 취약지점에서 동서방향으로 길게 발달되어 있는 현상은 무령왕릉의 구조 변형과 관련이 있는 것으로 해석된다.

강회다짐층은 시공시 석회의 배합이 불균질하여 국부적으로 지름이 10-20 cm 정도의 진흙덩이가 많이 섞여 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 현상은 무령왕릉의 연도 상부의 강회다짐층과 무령왕릉 관람실 상부 강회다짐층에서 다수 발견되었다. 5호분 봉분 북동부와 6호분 봉분의 북부 및 서부는 강회다짐층의 상태가 매우 열악하여 쉽게 부스러질 정도의 강도를 갖고 있었으며 특히 6호분이 심한상태이다.

1996년 10월 1일부터 1997년 9월 30일까지 1년간 무령왕릉의 벽체거동양상은 전반적으로 남쪽 방향성분이 우세하다(서만철,1997). 무령왕릉의 현실구조가 남동쪽성분이 우세한 비틀림운동을 하기 때문에 그 상부에 있는 강회다짐층이 무령왕릉의 북서쪽과 남동쪽에서 균열이 주로 발생한 것으로 해석된다. 이러한 사실은 현재의 구조적 문제를 해석하지 않으면 누수방지층을 재시공한다 해도 역시 동일한 문제점이 야기될것으로 판단된다.

(2) 인공주수시험

- 불포화대에 시추된 BH-2, BH-3에서 투수시험을 실시하였다. 고분군 축조 과정에서 만들어진 다짐층(BH-2)의 투수계수가 풍화암과 연암으로 구성된 원지반(BH-3)보다 투수계수가 작으며, 이는 1997년 4월부터 9월까지 두 공에서 관측한 수위변화 특성과 일치한다.
- 고분군 북측 능선에 수조를 설치하고 소방차를 동원하여 인공함양시험을 실시하였으며 시험 결과는 다음과 같다.
 - 함양율의 변화로부터 계산된 원지반의 투수계수는 $2.2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 이다.
 - 시험 시작 후 약 15시간이 경과한 후부터는 비교적 일정한 함양율을 보여 wetting front가 수직적으로는 지하수면에 이르렀으며, 수평적으로는 더 이상 진행하지 못하는 것으로 판단된다. 즉 이 시간 이후로는 지층의 압력수두가 정상 상태(steady state)에 이르러 비교적 일정한 함수비를 유지하는 것으로 추측된다.
 - 함양시험 동안 7호분 내부에서 누수현상을 관측할 수 없었다.
 - 3개의 시추공에서 측정된 수위 자료로부터 wetting front의 변화를 도시하였으며 고분군과는 4 m 이상의 거리에 위치하는 것으로 나타났다.
- 함양시험에 의해 포화대로 유입된 물은 BH-1에서의 EC와 산소동위원소비의 변화를 통하여 확인할 수 있었다.
- 이상의 실험을 종합할 때 고분군 누수현상의 주된 원인은 고분군 상부에 설치된 누수방지층

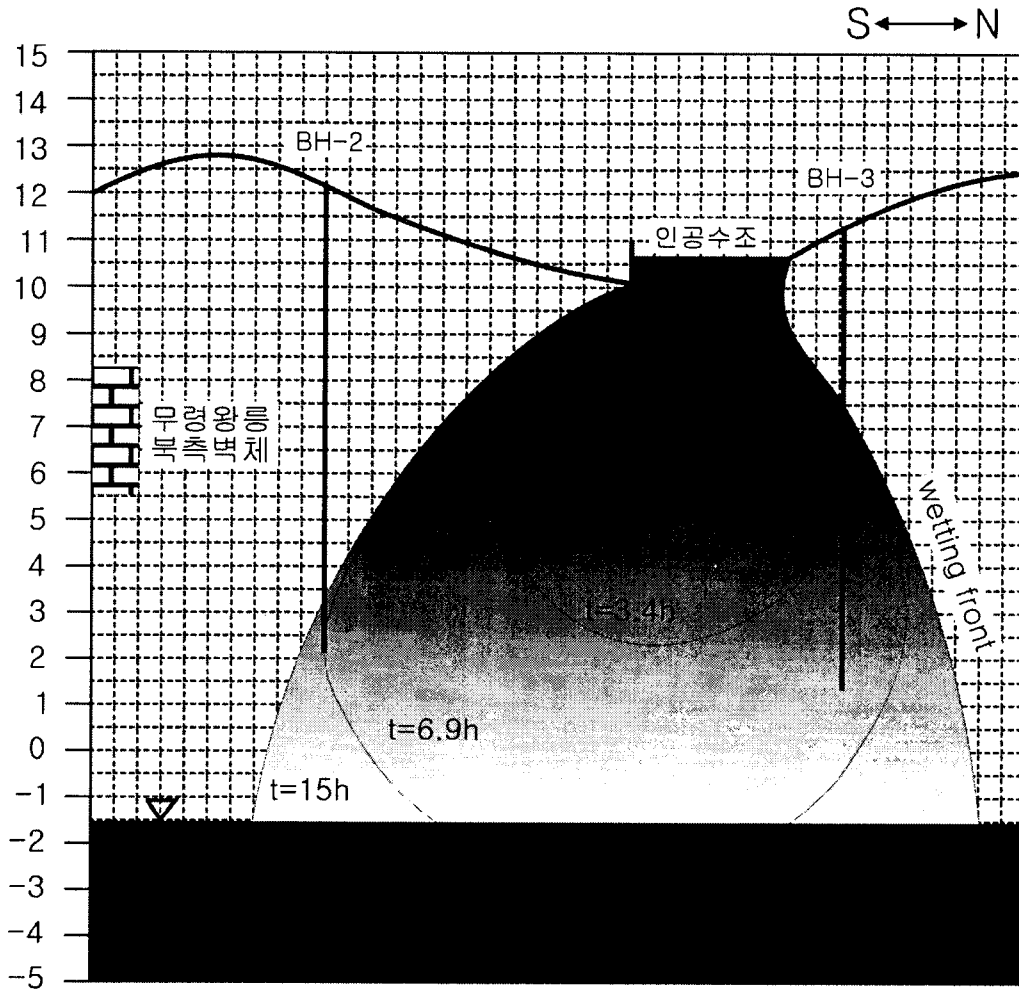


Fig. 6. 송산리 고분군 인공함양시험에 의한 Wetting Front 단면도

에 균열이 발생하여 제 역할을 하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

- 따라서 누수 대책으로는 트렌치에 의한 유도배수시설보다는 효과적인 누수방지층의 보강이 더 시급한 것으로 판단된다.

5) 무령왕릉의 구조안전 현황 분석

본 연구에서 수치해석에 이용된 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)은 미국의 ITASCA Consulting Group, INC.에서 개발된 프로그램으로, 여러 가지 지반구조물의 해석에 사용되는 유한차분법 프로그램이다. FLAC은 흙의 거동을 설명하기 위한 여러 가지 탄소성 모델을 사용할 수 있으며, 본 과업에서는 지반의 해석에 가장 많이 사용되는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다.

석실 내부의 변위 및 응력상태를 살펴보기 위해서 Fig. 7과 같이 단면을 분할하였고, Fig. 8과 같이 천정에 1, 2, 3, 동·서쪽 내벽에 4, 5의 Reference Point를 지정하여 변위와 응력을 추적하였다.

고분 상부의 모든 구조물은 고분 전체에 사하중으로 작용하므로 천정부와 내벽에서 침하와 변위를 야기시켰으며, 또한 지속적인 강우침투와 배수불량으로 주변지반 및 내벽의 함수비가 증가된 것으로 보인다. 발굴 후 석실내부까지 뺏어있던 식물의 뿌리를 완전 제거함으로써 침투수의 제거기능을 감소시키고, 뿌리 주변의 부간극압의 제거로 지반의 강도가 감소한 것으로 판단된다. 또한 누수로 인한 함수비의 증가는 자중의 증가와 강도의 저하를 의미하고, 이로 인해 천정부와 내벽의 변위를 가중시켰다. 봉분의 중심이 석실의 북동쪽에 위치하고, 입구부의 조성으로 인한 토압의 경감으로, Fig. 9와 같이 전체적으로 남쪽 방향으로 변위가 발생하였다.

각 단면에서 현재상태의 변위 경향을 분석하여 보면, 횡방향 변위는 주로 석실의 좌우에서 석실 내부방향으로 발생하는 것으로 나타났으며, 동쪽 내벽 중앙(Point 4)의 최대 수평변위량은 13.2 mm 발생한다. 또 하나의 주된 변위는 석실의 상부에서 하방향 수직변위가 일어남을 보여주고 있으며, 천정부(Point 2)의 최대 침하량은 34.3 mm가 발생하였다. 또한 석실의 아랫부분은 석실의 형성으로 인한 하중 제거효과로 변위가 거의 없고, 바닥면에서는 약간의 rebound현상도 나타나고 있다. 석실 주위에서 전반적으로 남향의 종방향 변위가 일어남을 보여주고 있으며, 특히 입구부분의 구조물 조성으로 인해서 고분의 입구부와 북쪽 벽면의 변위가 크게 나타났다.

현재상태에서 각 단면의 최대 주응력의 경향을 분석하면, 주응력 선도가 석실을 감싸도는 arching effect를 종·횡단면 모두에서 뚜렷이 보여주고 있다.

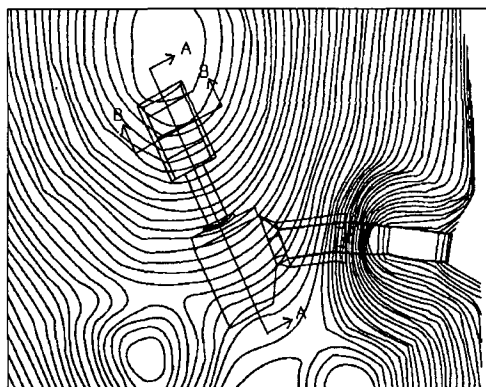


Fig. 7. 무령왕릉 단면분할

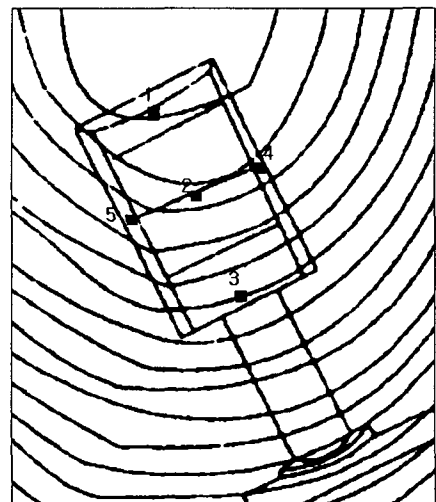


Fig. 8. 무령왕릉 Reference Point

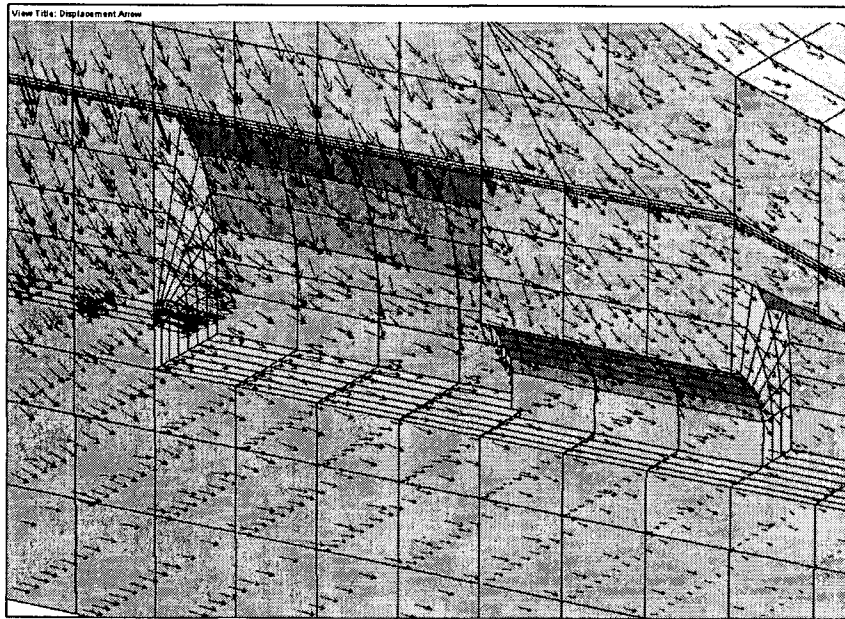


Fig. 9. 무령왕릉 변위의 방향과 크기

6) 보존과학적 문제점 분석

상기한 바 있는 고분군의 벽돌파손과 벽체거동의 원인은 본 연구결과 다음과 같이 규명되었다.

- ① 누수방지층의 균열로 인하여 강우가 침투하고 고분군의 상부로부터 지하수가 유입되고 배수가 불량하여 고분군주위의 지반이 약화됨.
- ② 발굴조사후 식생제거로 인하여 식물의 뿌리에 의한 지반보강 효과와 함수비 감소 효과가 없어서 고분주위의 지반의 물성치가 감소하고 지반의 지지력이 약화되어 고분의 변위가 발생됨.
- ③ 발굴조사후 봉분조성으로 인한 하중의 증가
- ④ 봉분의 비대칭적 분포로 인하여 토압의 분포가 비대칭적임.
- ⑤ 상기원인으로 인하여 고분이 지중에서 새로운 평형을 유지하기 위하여 역학적 거동을 일으킴.
- ⑥ 고분벽돌에 남조류가 서식하여 그 뿌리에 의하여 벽돌이 약화됨.

이와같이 발굴후 인위적인 환경변화와 지속적인 강우침투 및 배수불량의 영향은 고분군의 안정성에 상당한 위험을 초래하였으며, 현 상태는 각 고분에 대한 보강이 불가피한 것으로 판단된

다. 고분벽들의 깨짐, 고분 벽체의 거동, 조류의 서식 등을 포함하여 송산리고분군에서 발생되고 있는 보존과학상의 제반 문제점들은 1차적으로 누수 및 침투수에 의한 결과이다. 그러므로 무엇보다도 고분군 내부 및 고분주변으로의 강우 및 지하수 침투를 막는 차수대책이 시급하다. 또한 이미 발생한 변위가 더 이상 진행되지 않도록 봉분의 하중을 경감하고 수평토압의 균형을 이루는 보강대책이 시급한 실정이다.

3. 무령왕릉 보존대책

1) 구조안전 대책

구조안전대책으로서는 직접적인 보강대책과 간접적인 보강대책이 가능하지만, 대상구조물이 국보급 문화재임을 고려할 때 근본적인 구조변경이 불가피한 직접보강대책보다 간접적인 보강대책이 바람직한 것으로 판단된다. 간접적 보강대책으로서는 현 봉분규모의 축소, 불균등토압의 조정, 강우침투 방지를 위한 최종복토시스템, 유도배수구의 설치 및 능선 상부로부터의 지하수 차단시설을 포함한다.

봉분의 규모는 본 보고서 6장에 제시한대로 현재보다 최대 2 m 정도 제거하여 규모를 조정하고 균형적인 토압을 이루게 시공한다. 또한 누수방지 시설과 지하수 차수시설 시공을 통하여 지반의 지지력을 회복시킨다. 또한 불균등 토압이 심하게 작용하는 5호분 동측에 대해서는 다짐 성토를 통하여 수평토압이 증가되도록 시공하여야 한다.

6호분의 남측벽 주위는 벽돌결합상태가 느슨해져 일부 재시공 할 필요가 있으며, 무엇보다도 무령왕릉 연도호벽에 대한 지지대가 필요한 것으로 판단된다. 5호분 연도 북측부분의 덮개석은 현재 균열된 상태로서 보다 튼튼한 지지대로 교체하는 작업이 선행되어야 한다.

특히 봉분의 일부 제거 등의 구조적 변화를 야기하는 시공시에는 고분내의 벽체에 대한 안전 지지대를 설치한 후 시공하는 것이 바람직하다. 이러한 시공이 완료된 후에도 1년이상 벽체의 거동여부에 관한 계측을 실시하여 구조안전에 대한 최종판단이 필요하다.

2) 누수 및 차수 대책

강우의 유입을 차단하기 위하여 「송산리고분군의 현황과 보존대책」에서 제시한 바와 같이 5, 6, 7호분 주위를 일괄적으로 Geomembrane 및 Geotextile, 진흙다짐층 공법을 이용한 누수방지층을 시공한다.

또한 능선 상부로부터의 지하수유입을 차단하기위하여 무령왕릉 북부 원지반에 트렌치를 파고 유도 배수시설을 3층 이상 시공한다. 단, 트렌치의 깊이는 5호분 현실의 바닥보다 2 m 깊게 시공한다. 누수방지 및 차수시설 시공시 지반의 함수비 및 지하수위를 연속계측할 수 있는 TDR (Time Domain Reflectometry) 시스템을 고분주위 및 3개 보링공에 설치하여 효과적인 보수여부, 차수시스템의 손상여부, 지하수위의 변동 여부를 파악할 필요가 있다.

3) 남조류 제거방안 및 향후대책

조류의 서식상황은 현재 6호분이 가장 심각하며 7호분이 그 다음이다. 미흡하지만 그간 보존관리가 이루어진 덕택이라 할 수 있다. 남조류에 대해서는 금번 연구를 통하여 효과가 입증된 K101 시약을 남조류가 서식하는 벽면에 분무하고 표면에 습포를 덮어 처리한 후 자외선을 24시간 조사한다. 3개월의 휴지기를 두어 새로 유입된 포자 및 벽돌 깊숙히 있는 포자가 발아되기를 기다려 위의 과정을 반복처리하며 이러한 과정을 수회 반복한다. 또한 완벽한 차수대책을 통하여 벽체후면의 지반으로부터의 수분유입을 완전차단하여 토양박테리아 및 남조류의 유입을 차단하고 습도를 저감한다.

4) 공기조화 대책

5호분, 6호분 및 7호분 모두 향온향습장치를 전실에 설치하고 덕트를 통하여 고분내 현실로 순환시키는 방법이 고분구조에 영향이 없고 설치와 온습도 조절이 용이하다고 판단 된다. 전실과 현실은 이중 유리로 분리시킨다.

5) 사후모니터링 대책

상기의 보수대책이 실시 시공된 후 이에 대한 평가 및 향후의 영구보존을 위한 사후계측시스템은 필수적이라 할 수 있다. 각종 계측자료를 이용한 장기적이고도 세심한 분석을 통하여 완벽한 보존관리가 가능할 것이기 때문이다. 사후계측시스템에 반드시 필요한 항목은 다음과 같다.

1. 자동 벽체경사변화도 계측기(tiltmeter system)
2. 차수시설 하부의 자동 토양함수비 및 지하수위 계측시스템(TDR System)
3. 고분내 자동 온습도계측기

이들 자동계측 시스템은 일괄적으로 관리사무실의 계측전용 컴퓨터에 항상 떠있도록 설치하며 이들을 관리하고 자료분석을 통하여 최적의 대책을 강구할 수 있는 전문인력의 배치가 필수적이다.

4. 결론

무령왕릉의 보존대책을 수립하기 위하여 누수 현상, 고분구조의 벽체거동 상황 및 구조안전 점검, 고분 내에 서식하는 조류의 제거, 고분내 습기 및 결로현상 제거를 위한 공기조화시설 등을 포함하는 종합 정밀조사를 1996년 5월 1일 부터 1997년 4월 30일 까지 1년간 수행하였다. 이러한 연구를 수행하기 위하여 기초 지반에 대한 정밀측량, 고분 내외부의 년중 온습도 모니터링, 지반의 내부물성 파악을 위한 지구물리 탐사, 시추 자료에 대한 각종 물성실험, 지반의 투수계수 측정 및 지구화학적 분석을 실시하였다.

고분 내외부에 대한 정밀측량 결과 봉분 중심이 현실 중심보다 북동쪽으로 5 m 이격되어 있다. 무령왕릉의 경우는 발굴 당시에도 유사한 분포를 하였으나, 이로 인하여 불균형적인 토압을 발생시키는 원인이 되고 있다. 벽돌깨짐 상황 조사결과 무령왕릉의 조사 대상 벽돌 6025장중 1972년에는 435장 파손되었던 것이 1996년 조사결과 1072장이 파손된 것으로 밝혀져 파손율이 2.5배로 증가하였다. 6호분의 경우는 이보다 더 심하여 벽돌 파손율이 2.9배로 증가하고 있다. 1972년 상황은 약 1450년간 진행된 것이고 1996년의 상황은 불과 24년간 진행된 것임을 감안할 때 고분이 발굴된 이후 벽돌의 균열은 상당한 가속도로 진행되어 온 것이 사실이며 이대로 진행 된다면 더욱 더 가속화될 것으로 판단된다.

고분벽체의 거동상태를 계측한 결과 무령왕릉 동측벽의 경우 우기와 건기에 각각 2.95 mm/myr 및 1.52 mm/myr의 거동을 보여 우기에 지하수 유입에 의한 지반의 약화로 인하여 건기보다 2배 정도 거동하는 양상을 보인다. 한편, 연도 입구의 호벽은 건기에 전실쪽으로 0.43 mm/myr, 연도 쪽으로 2.05 mm/myr의 거동을 보여 무령왕릉에서는 가장 심한 거동을 보이고 있다. 6호분의 거동현황은 건기에만 측정된 바, 현실의 동측벽과 서측벽이 각각 벽체 뒤쪽으로 7.44 mm/myr, 현실 안쪽으로 3.61 mm/myr의 거동을 보여 조사대상 5호분, 6호분, 7호분 중 가장 심한 거동을 보이고 있다. 이는 고분 벽돌의 깨짐이 6호분이 가장 심하다는 사실과 무관하지 않은 것으로 판단된다.

봉분내부의 토양층구조에 대한 지오레이다 영상단면을 분석한 결과 무령왕릉 연도상부의 누수 방지층이 심하게 균열되어 있음을 발견하였다. 이 곳은 고분내부로 직접누수가 발생하는 곳이다. 직접누수와 지하수 형태로 유입된 침투수는 고분군 주위의 지반의 함수비를 증가시켜 지반의 지지력을 약화시키고 또한 고분내로 서서히 유입되어 고분내부의 습도를 100%로 유지시키는 주된 원인이다. 이러한 높은 습도는 고분내의 남조류의 번식을 가져 왔으며 남조류의 번식은 현재 6호분이 가장 심각하고 7호분이 우려되는 수준이며 5호분은 문제가 없는 것으로 판단된다.

이와 같이 고분군의 발굴후 인위적인 환경변화와 지속적인 강우침투 및 배수 불량에 의한 영향은 고분군의 안정성에 상당한 위협을 초래하였으며, 현 상태는 각 고분에 대한 보강이 불가피한 것으로 판단된다. 고분 벽돌의 깨짐, 고분 벽체의 거동, 조류의 서식 등을 포함하여 송산리 고분군

에서 발생되고 있는 보존상의 제반 문제점들은 일차적으로 누수 및 침투수에 의한 결과이다. 그러므로 무엇보다도 고분군 내부 및 고분 주변으로의 강우 및 지하수 침투를 막는 차수 대책이 시급한 것으로 판단된다. 또한 이미 발생한 변위가 더 이상 진행되지 않도록 봉분의 하중을 경감하고 토압의 균형을 이루는 보강대책이 시급한 실정이다.

고분군의 보존대책으로서는 고분의 구조안전에 관하여 근본적인 구조변경이 불가피한 직접보강대책보다 간접적인 보강대책이 바람직한 것으로 판단된다. 간접적 보강대책으로서는 현 봉분규모의 축소, 불균등토압의 조정, 강우침투 방지를 위한 최종복토시스템, 유도배수구의 설치 및 능선 상부로부터의 지하수 차단시설을 포함한다. 이러한 차수대책은 고분군의 제문제를 해결하는 가장 근본적인 대책이라 할 수 있다.

고분내 결로현상 및 습기 제거를 위하여 항온항습장치를 전실에 설치하고 덕트를 통하여 고분내 현실로 순환시키는 방법을 제안하며 외부 온도의 영향을 덜 받게 하기 위하여 전실상부 토양을 현재보다 두껍게 하고 전실의 천정마감재를 열전도도가 낮은 목재로 교체하며 출입문의 이동등을 제안하였다.

금번 조사 연구를 통하여 얻어진 각종 보수 및 보존대책은 고분구조 자체에 가능한 한 최소의 변화를 주면서 가장 시급한 문제점부터 해결하도록 제시되었다. 설계 및 시공 단계에서는 보수의 경중을 가려 순서에 입각하여 이루어져야만 하며 설계 및 시공 단계에서 고분의 구조안전에 영향을 주지 않도록 각별한 주의가 요망된다.

끝으로, 상기의 보수대책이 실시된 후 이에 대한 평가 및 향후의 영구 보존을 위한 벽체경사 계측, 함수비 및 지하수위 계측, 온습도 측정 등을 포함하는 사후계측시스템은 필수적이라 할 수 있다. 각종 계측자료를 이용한 장기적이고도 세심한 분석을 통하여 완벽한 보존 관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 강준목, 1997, 백제 무령왕릉 정밀측량 및 공간 분석, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 21-37.
- 김광훈, 1997, 生物的 要因에 의한 武寧王陵의 毀損低減方案 研究, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 107-124.
- 김유선, 1997, 백제 무령왕릉 발굴직후의 보존과학 조사연구 개황, 문화재안전과학연구회 학술심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 3-17.
- 문화재관리국, 1973, 무령왕릉 발굴보고서, p. 248p.
- 서만철, 1997, 송산리고분군의 현황과 보존대책, 공주대학교 기초과학연구소, 충청남도 공주시, p. 467
- 서만철, 박은주, 1997, 경사도변화 계측을 통한 백제 송산리고분군의 지하벽체거동 특성과 안정성, 대한지질

- 공학회지, 7(3), p. 191-205.
- 서만철, 이남석, 조기호, 1995, 공주지역 백제고분조사, 공주대학교 박물관, p. 353.
- 서만철, 이창환, 정계옥, 김동현, 1997, 송산리고분군의 지구물리학적 조사를 통한 고분축조방법 고찰, 보존과학회지, 6(1), p. 61-70.
- 서오선, 이남석, 1997, 송산리 고분군의 향후 보존방향, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 177-187.
- 윤근일, 1988, 공주 송산리 고분 발굴 조사 개보, p. 307~333.
- 윤무병, 1991, 무령왕릉의 구조, 공주대학교 백제문화연구소 간행 '백제 무령왕릉', p. 113-129.
- 이금배, 1997, 무령왕릉의 최적공기조화 시스템 연구, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 127-153.
- 이병호, 1997, 武寧王陵의 벽체 및 기반변위에 관한 이론적 고찰, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 157-174.
- 이우진, 임형덕, 안신환, 1997, 수치해석을 이용한 무령왕릉의 안전성검토와 대책, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 73-87.
- 이태녕, 1991, 保存科學的 側面에서 본 武寧王陵, 공주대학교 백제문화연구소 간행 '백제문화', 21, p. 177-196.
- 정상만, 임경호, 이우진, 서만철, 1997, 송산리 고분의 누수원인 분석, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 91-104.
- 최석원, 1997, 송산리고분지역의 토양특성, 문화재안전과학연구회 학술 심포지움 논문집 '백제무령왕릉의 보존대책', p. 191-210.
- 문화재 관리국 문화재 연구소, 1985, 한국의 고건축 7호, 세신문화사
- 공주대학교 생산기술연구소, 금강유역의 수문관측망 분포의 적정성검토, 1995
- 한국건설기술연구원, 시험 유역의 운영 및 수문특성 조사·연구, 1995
- 松井 健, 岡崎正規, 1993, 環境土壤學, 朝倉書店.
- 新井 英夫 1985. 石造文化財 生物劣化 對策. 石造文化財 保存 補修 p. 84-95.
- Toy, John, 1993, The story of the foundations, York Minster, p. 44.
- Bates, E.R., 1973, Detection of subsurface cavities(Miscellaneous paper S-73-40), U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Mississippi.
- Diniels, J. J., 1978, Interpretation of buried Earth medel, Geophysics, v.43, p. 998-1101.
- Allen, S.E., H. M. Grimshaw, J. A. Parkinson and C. Quarmby. 1974. Chemical analysis of ecological materials. Blackwell Sci. Pub., Oxford. p. 565.