

## 공주 송산리고분군 누수현상 원인 분석을 위한 인공함양시험 및 수치모델링

# An Artificial Recharge Test and Its Numerical Simulation for the Analysis of Seepage in the Songsanri Tomb Site of Kongju

---

구민호(Min Ho Koo)  
서만철(Man Cheol Suh)

공주대학교 지질환경과학과  
공주대학교 지질환경과학과

---

### 요약/ABSTRACT

여름철 집중강우시 발생하는 공주 송산리고분군의 누수 원인을 분석하기 위하여 인공함양시험을 실시하였다. 함양시험을 모사하는 2차원 불포화 지하수 유동 모델을 개발하고, 시험 중 측정된 관측정 수위와 함양량의 변화를 이용하여 모델변수의 보정을 수행하였으며 보정된 모델변수에 의하여 함양시험 모사를 실시하였다. 함양시험 및 모사 결과 고분군 누수현상의 주된 원인은 고분군 상부의 누수방지층에 발생한 균열을 통한 지하수의 직접적인 유입에 의한 것으로 분석되었다. 장기간 강우가 지속될 경우 고분군 북측의 원지반으로부터 불포화대를 통한 지하수의 유입 가능성이 존재하나 고분군 북측 벽체에 10% 내외의 유효포화도 증가만을 일으킬 것으로 정류상태 모사를 통하여 분석되었다. 따라서 고분군 누수 방지를 위한 대책으로는 트렌치에 의한 유도배수시설보다는 효과적인 누수방지층의 보강이 더 시급한 것으로 판단된다.

An artificial recharge test was performed to analyze the source of seepage observed inside the Songsanri tombs of Kongju during the rainy season. In order to simulate the test, a two-dimensional unsaturated groundwater flow model was developed. By the measured water level variation in the observation wells and in the artificial water tank, the model was calibrated to estimate the model parameters such as fitting parameters in the constitutive relations(  $n$  and  $\alpha$  ), the saturated volumetric water content, the residual volumetric water content, and the saturated hydraulic conductivity. Using the calibrated parameters, the recharge test was simulated. The results of the test and simulation show that the major source of the seepage is the downward groundwater flow through cracks in the

protection layer above the tombs. It was also analyzed by the steady state simulation that, with a perfect protection layer, a long-term precipitation could cause only 10% increase of the effective saturation around the north side of the Muryong royal tomb by infiltration of the unsaturated groundwater from the North. Therefore, it is concluded that the most urgent protection plan for the tombs with respect to seepage is to reconstruct an effective waterproof-layer rather than a trenched drainage system.

## 서 언

송산리고분군은 백제 시대의 대표적 문화재들이 다수 출토된 무령왕릉을 포함하는 국가적으로 매우 중요한 문화유적이다. 송산리고분군에 대한 종합 정밀조사에서 밝혀진 바와 같이 고분군의 5호분과 7호분은 여름철 집중강우시 심한 누수현상이 발생하고 있으며, 이 기간 동안 벽체거동이 더욱 급격하게 일어나는 것으로 관측되었다(서만철, 1997). 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(서만철과 박은주, 1997).

송산리고분군의 누수현상을 일으키는 지하수의 침투경로는 주로 두 가지로 예상된다. 첫째는 고분군 상부의 누수방지층에 발생한 균열(crack)을 통한 지하수의 직접적인 유입을 들 수 있으며 이러한 균열의 발생은 종합 정밀조사시 지하레이다 탐사 자료의 해석을 통하여 이미 확인된 바 있다. 둘째는 지형적인 요인에 의한 유입으로 고분군 북측의 고지대에 떨어진 빗물이 지하로 침투하면서 불포화대를 통하여 상대적으로 저지대에 위치하는 고분군 방향으로 이동하여 고분군의 북측 벽체에 누수를 일으키는 것으로 예상된다. 따라서 서만철(1997)은 종합 정밀조사 보고서에서 다음과 같은 누수 및 차수 대책을 제시하였다: 1) 강우의 직접적인 유입을 차단하기 위하여 고분군 주위를 일괄적으로 Geomembrane 및 Geotextile, 진흙 다짐층 공법을 이용한 누수방지층을 시공하고; 2) 능선 상부로부터의 지하수 유입을 차단하기 위하여 고분군 북부 원지반에 트렌치를 파고 유도 배수 시설을 시공한다.

본 연구에서는 송산리고분군 누수현상의 원인이

라 예상되는 두 번째 요인, 즉 지형적인 요인에 의한 지하수의 유입 경로와 그 정도를 추정하기 위하여 인공함양시험을 실시하였다. 시험 결과의 분석을 통하여 차수 대책으로 고분군 북부 원지반에 설치될 트렌치의 위치와 적정시공깊이를 제시하는 것이 본 연구의 최종 목표이다. 본 연구는 다음과 같이 4 단계의 과정으로 이루어졌다: 1) 고분군 주변에 설치된 2 개의 시추공에서 현장투수시험을 실시하여 다짐층과 원지반의 투수성을 비교하였다; 2) 무령왕릉 북쪽 12m 지점에 인공수조를 설치한 후 소방차를 동원하여 물을 채우고 인공함양시험을 실시하였으며, 인공함양 동안 3개의 시추공에서 수위변화를 측정하여 불포화대를 통과하는 소방수(인공함양수)의 유동경로를 추적하였다(Fig. 1); 3) 시험 시작 후 10일간 무령왕릉 동측에 위치하는 시추공 BH-1에서 지하수를 취수하여 pH, EC, 및 산소동위원소비를 측정, 포화대에 유입된 인공함양수를 추적하는데 이용하였다; 4) 인공함양시험 동안 고분군이 위치하는 불포화대에서의 함수비의 변화를 수치모델링을 통하여 분석하였다.

## 고분군의 지반 특성

고분군 주변의 지질은 시대미상의 반상암쇄편마상화강암과 선캠브리아기의 혼성편마암을 부정합으로 피복한 역암이 발달 분포하고 있다. 시추조사(서만철, 1997)를 통하여 확인된 고분군의 지반은 크게 성토층, 다짐층, 풍화토층, 및 풍화암으로 구분된다(Fig. 2).

성토층은 고분 발굴 후 복원과정에서 만들어진 최상부 피복층으로 점토질 및 실트질 모래로 구성되었다. 층의 두께는 위치에 따라 0.2-3.0m이며 표준관입시험에 의한 N치는 3/30-26/30으로 매우 느슨하거나 조밀한 상태이다. 다짐층은 고분 형성과

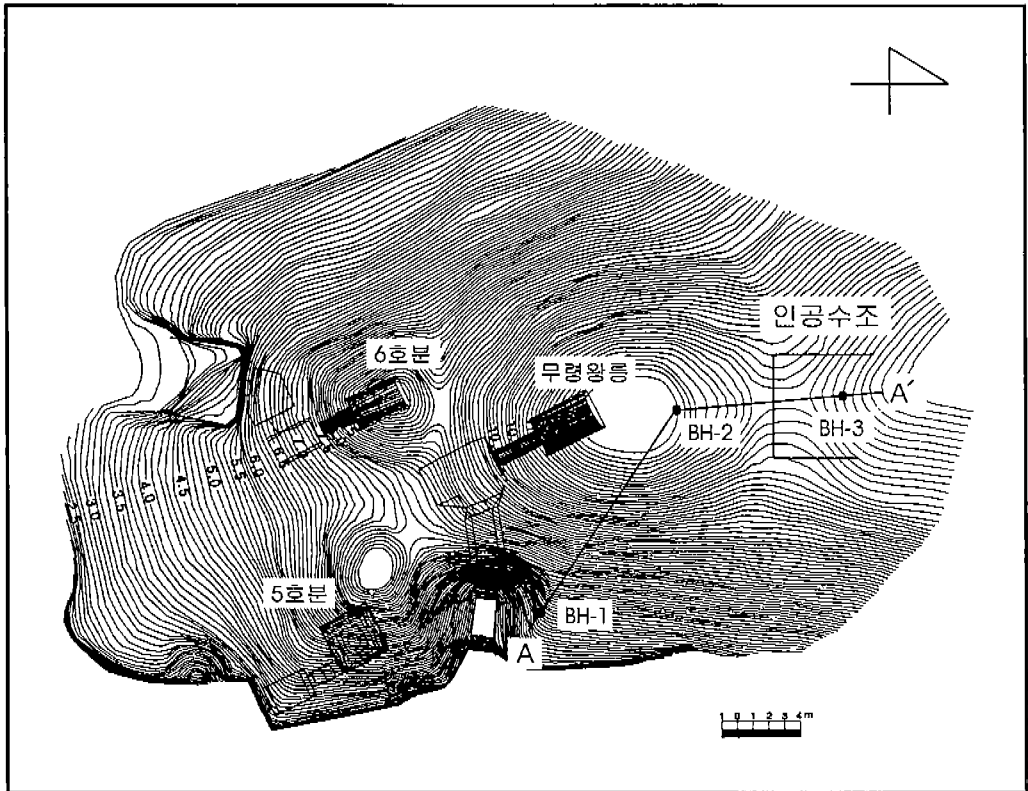


Fig. 1. Location map of 3 boreholes and the water tank in the Songsanri tomb site (modified from Suh and Park, 1997).

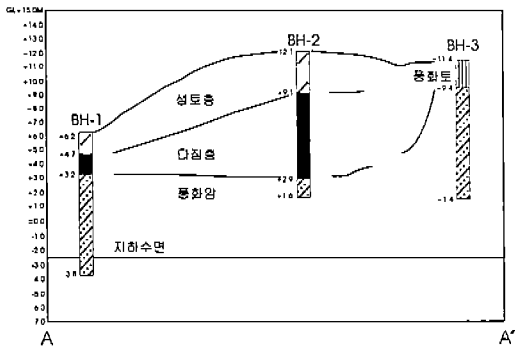


Fig. 2. Cross-sectional map of the Songsanri tomb site from 3 boreholes.

정에서 만들어진 층으로 추정되며 실트질 모래와 자갈입도의 각력암편으로 구성되었다. 암편은 각력암, 집괴암, 응회질암 등의 화산쇄설암질로 원지반

을 구성하는 풍화토층과는 구조적 구분이 다소 불가능한 상태이다. 층 두께는 1.5-6.2m이며 N치는 50/26-50/10으로 매우 조밀한 상태이다. Fig. 2에는 도시되지 않았으나 성토층과 다짐층의 사이에는 1991년 고분군에 대한 보수공사로 설치된 강회다짐(능에 빗물이 스며들지 않도록 생석회를 다지는 작업)에 의한 누수방지층이 위치한다. 층의 두께는 20cm 정도이며 넓이는 1180 m<sup>2</sup> 이다. 풍화토층은 원지반의 완전풍화대(completely weathered: CW)를 나타내는 층으로 화산성각력암, 집괴암, 응회암으로 구성된다. N치는 48/30으로 조밀한 상태를 보인다. 풍화암은 원지반의 중간풍화대(highly weathered: HW, or moderately weathered: MW)로 풍화토층과 동일한 구성암을 나타낸다. N치는 50/16-50/2로 매우 조밀하며 일부구간에서 10-30% 정도의 암편코아를 회수할 수 있었다.

## 현장투수시험

### 시험방법 및 한계

송산리고분군 축조시 만들어진 다짐층과 원지반(풍화암)의 투수계수를 비교하기 위하여 고분군 주위에 설치된 2개의 시추공(BH-2, BH-3)에서 현장투수시험을 실시하였다. Fig. 2의 지층단면도에 나타난 바와 같이 BH-2는 다짐층, BH-3은 원지반에 설치되었다. 연구지역의 시추공 여건을 고려하여 단공식 현장투수시험법의 하나인 슬러그 시험을 실시하였다. 슬러그 시험은 시추공내에 일정량의 물을 순간적으로 주입한 후 시간에 따른 수위 변화를 측정, 그 결과를 분석하여 물로 포화된 지층(대수층)의 투수계수를 계산하는 시험방법이다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 고분군 지역의 지하수면(water table)은 표고 -2.5m 부근에 위치하므로 BH-2와 BH-3이 시추된 구간은 불포화대를 나타낸다. 본 연구에서 실시한 슬러그 시험법은 원칙적으로 지하수로 포화된 지층을 가정하므로 불포화대에 위치하는 BH-2와 BH-3에서의 시험결과에 슬러그법 계산식을 적용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 두 시추공 시험 자료로부터 다짐층과 원지반이 갖는 투수계수의 상대적인 크기를 비교하는데 목적을 두었다.

### 시험결과

시험 시작 전 두 시추공 BH-2 (공경=39mm, 공심도=10.5m), BH-3 (공경=39mm, 공심도=10.0m)은 모두 수위가 측정되지 않아 시추공이 설치된 구간의 지층이 불포화 상태에 있음을 확인하였으며, PVC 스트레나가 설치된 시추공에 미리 준비한 물을 순간 주입하여 케이싱 선단부근까지 수위를 상승시킨 후 시간에 따른 수위 변화를 측정하는 방법으로 투수시험을 실시하였다. 시험 결과는 Fig. 3과 같으며 그림으로부터 다음의 사실들을 유추하였다:

- 1) 공 상단까지 수위를 상승시키는데 필요한 주입량이 BH-2보다 BH-3에서 크게 나타나는 데 이는 주입된 물이 BH-3에서 더 빠르게 주변의 불포화 지층을 통하여 침투됨을 의미하므로 다짐층(BH-2)에 비하여 원지반(BH-3)의 투수계수가 클 것으로 추정된다.
- 2) 수위강하 곡선의 3.8m 부근에서 공통적으로

보여주는 변곡점은 시추공 내로 물이 유입될 수 있도록 설치한 스트레나 구간의 상단, 또는 지표수 유입 방지용 그라우팅의 깊이를 나타내는 것으로 추정된다. 즉 0m - 3.8m의 수위강하 구간에서는 일정한 두께의 스트레나(10m-3.8m=6.2m)를 통하여 공으로부터 물이 빠져나가므로 일정한 기울기의 수위강하 곡선을 보이며, 그 후 점차 스트레나를 통하여 물이 빠져나가는 구간의 두께가 줄어들면서 기울기가 점점 완만해지는 곡선을 나타낸 것으로 해석된다.

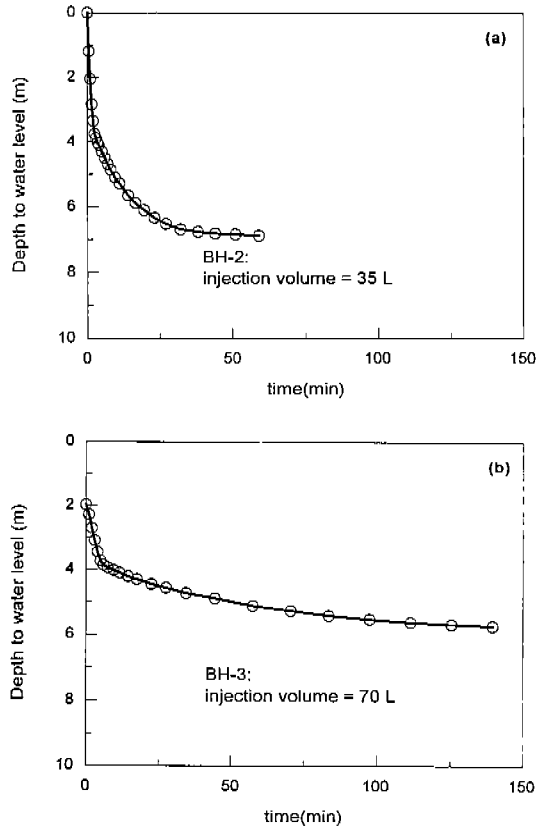


Fig. 3. Water level variation during the slug test for (a) BH-2 and (b) BH-3.

따라서 고분군 북측의 원지반은 상대적으로 큰 투수계수를 갖기 때문에 강우시 쉽게 빗물에 포화되며, 강우가 지나간 후에는 표고 -2.5m에 위치한

지하수면으로 빠르게 배수가 일어남을 예상할 수 있다. 고분군을 덮고 있는 다짐층의 경우 장기간의 집중강우시에만 포화되어 BH-2에 수위가 관측될 수 있으며, 일단 공에 유입된 물은 배수가 서서히 진행되므로 장기간 다짐층에 머물러 있을 것으로 추정된다. 이와 같은 시험 결과는 1997년 4월부터 9월까지 시추공에서 관측한 수위변화 자료와도 잘 일치한다(Fig. 4).

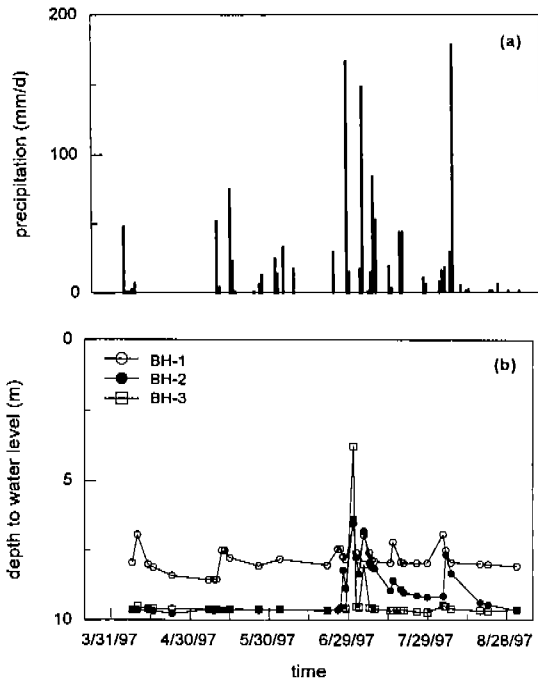


Fig. 4. Water level fluctuations of 3 boreholes in response to precipitation (modified from Sub and Park, 1997).

### 인공함양시험

고분군 상부에 설치된 누수방지층이 고분군으로의 지하수의 수직적인 유입을 효과적으로 차단하고 있다고 가정하면 누수현상의 주된 원인은 고분군 북측의 원지반에 침투한 지하수가 불포화대를 통하여 고분군 방향으로 이동하면서 발생하는 침윤에 의한 것으로 예상할 수 있다. 본 연구의 다음 과제

에서는 여름철 집중강우시 원지반에 유입된 빗물이 고분군 방향으로 얼마만큼 이동하여 고분군에 어떤 영향을 미치는지를 인공함양시험을 통해 밝히고자 한다. 즉 집중강우시 무령왕릉 북측 벽체에서 발생하는 누수현상의 한 원인일 것으로 예상되는 지형적인 요인에 의한 지하수의 유입을 확인하고, 시험 결과를 분석하여 차수 대책으로 고분군 북부 원지반에 설치될 트렌치의 위치와 적정시공깊이를 제시하고자 한다.

### 시험방법

Fig. 1과 같이 무령왕릉 북쪽 12m 지점에 다음과 같은 과정으로 인공수조를 설치하였다: 1) 지면에 10cm 깊이의 홈을 파고, 90cm×180cm 크기의 합판을 홈에 수직으로 세우고 되메움하였다(Fig. 5a); 2) 같은 방식으로 11장의 합판들이 서로 조금씩 겹치면서 전체적으로 지면 경사의 상류에 해당하는 북측 면을 제외한 3면이 U자 모양이 되도록 연결하였다(Fig. 5b); 3) 수조에 물을 채웠을 때 합판에 작용할 횡압력을 지탱할 수 있도록 20여 개의 버팀목을 수조의 바깥 면에 설치하였다(Fig. 5b); 4) 마지막으로 합판 연결부분의 틈을 통해 일어날 수 있는 누수를 차단하기 위해 비닐을 씌우고 적당한 양의 흙을 덮어 수조를 완성하였다(Fig. 5c).

인공수조를 설치한 후 소방차를 동원하여 물을 채우고 함양시험을 실시하였다. 시험기간동안 총 9대분(1대당 4,350 L)의 물이 주입되었으며 Fig. 5d는 소방차 2대분의 물을 채운 상태를 나타낸 것이다. 인공함양시험 동안 수조에 1m 길이의 자를 수직으로 세우고 수위변화를 일정한 시간간격으로 측정하여 함양률의 변화를 관측하였으며, 동시에 BH-1을 포함하는 3개의 시추공에서 수위 변화를 측정하여 불포화대를 통과하는 지하수의 유동경로를 추적하는 자료로 사용하였다.

### 함양률의 변화

수조에 설치한 자를 이용하여 수조의 수위변화를 측정한 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 소방차에 의해 수조에 물을 주입한 시간을 막대그래프로 표현하였으며 오른쪽 횡좌표는 주입량을 나타낸다. 수위 측정 자료를 시간에 대하여 수치미분하여 함

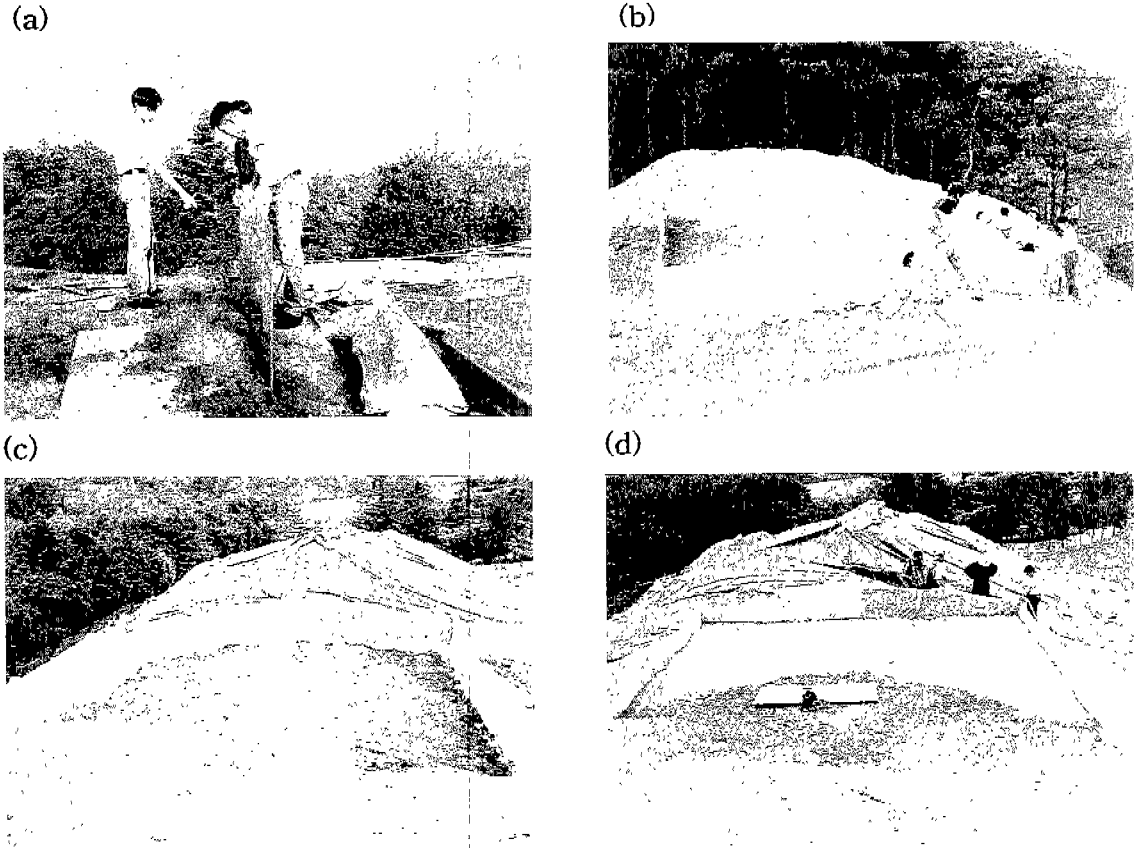


Fig. 5. Installation of the artificial water tank : (a) planting a plywood, (b) connecting plywoods, (c) completing the water tank, and (d) injecting fire-water.

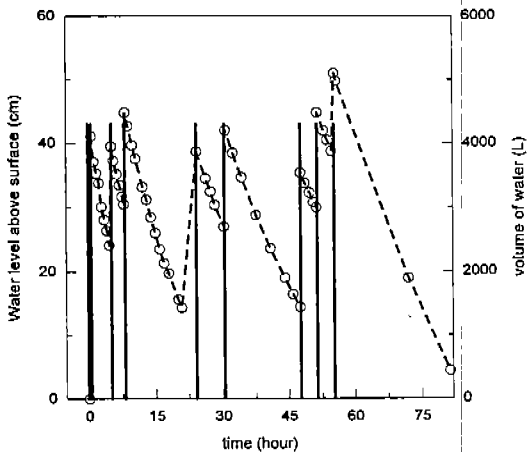


Fig. 6. Water level fluctuations in the water tank (open circles) and injection times of fire-water (bar chart).

양들의 변화를 알아보았다. 즉 입의의 두 시각에 측정한 수위 자료로부터 두 시각의 가운데 점에서의 함양률을 계산하였다. Fig. 7은 계산된 함양률의 변화를 나타내는데 수조에 물을 주입하여 수위를 높일 때마다 함양률은 순간적으로 증가하고 이후 서서히 감소하는 경향을 잘 보여준다. 함양률의 전반적인 변화를 보면 시험 초기에 5cm/h 이상의 높은 값에서 점차 감소하여 약 15시간이 경과한 후부터는 2cm/h 정도의 비교적 일정한 값을 나타낸다.

Darcy의 법칙은 포화대나 불포화대에서의 지하수의 유동을 나타내는데 z-방향에 대하여 쓰면 다음의 식과 같다;

$$q_z = -K_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (1)$$

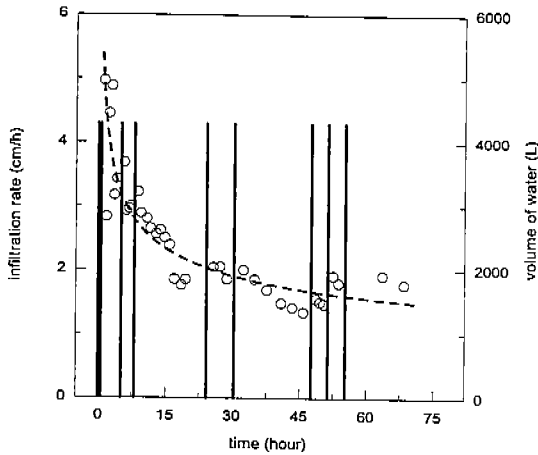


Fig. 7. Variation of infiltration rates calculated from the measured water levels in the tank.

여기서  $q_z$ =비유출량,  $K_z$ =투수계수,  $h$ =압력수두를 나타낸다. 인공함양시험 초기에 보이는 높은 함양률( $q_z$ )은 시험 전 자연 상태의 지층이 갖는 낮은 함수비에 기인한다. 즉 함수비가 낮을수록 지층의 흡착력과 모관력이 크게 작용하여 지층의 압력수두가 음의 값으로 크게 나타나고 결과적으로 식 (1)에 의해 높은 함양률을 나타낸다. 유입된 물에 의하여 지층의 함수비가 점차 증가하면서 포화 상태에 가까워질수록 흡착력과 모관력은 점차 감소하여 압력수두의 구배가 일정해지며 결과적으로 함양률도 일정하게 유지된다. 따라서 Fig. 7에 나타난 바와 같이 시험 시작 후 약 15시간 동안 지표면 수조로부터 지하로 침투한 물은 비교적 건조한 상태에 있었던 수조 하부 지층을 적시면서 함수비를 증가시켰을 것으로 추측된다. 15시간이 경과한 후부터 함양률은 전체적으로 2cm/h 정도의 비교적 일정한 값을 유지하면서 수조 수위에 비례하여 변화하는 양상을 보인다.

Fig. 7의 30-46시까지의 구간에 대하여 수조 수위에 대한 함양률의 변화를 보면 Fig. 8과 같다. 그림에서 수조 수위는 지표면에서의 압력수두를 나타내므로 식 (1)을 이용하면 직선의 기울기와 y-절편으로부터 압력수두가 0이 되는 깊이, 즉 포화두께( $\Delta z$ )와 투수계수( $K_z$ )를 계산할 수 있다. 계산된  $K_z$ 와  $\Delta z$ 는 각각  $2.2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ ,  $24.8 \text{ cm}$

이다.

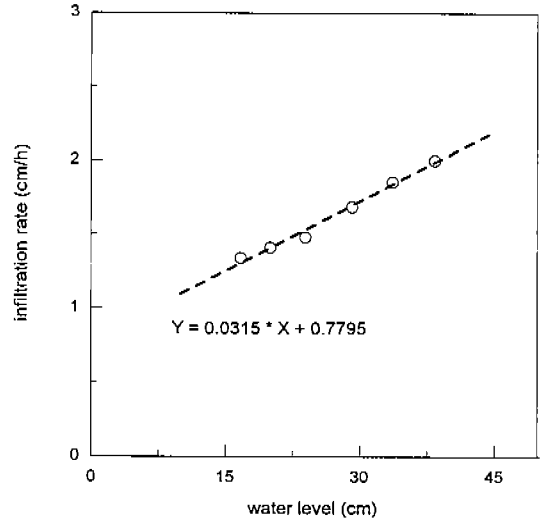


Fig. 8. Infiltration rate versus water level variations.

#### 시추공 수위 변화

함양시험 동안 3개의 시추공 BH-1, BH-2, BH-3에서 수위변화를 측정하여 함양지역 하부 불포화대에서의 물의 이동 경로를 추적하는 자료로 이용하였다. 측정 결과는 Fig. 9와 같다. 시험 시작 전 BH-1에서 측정된 지하수면의 위치는 -1.76m이며, 불포화대에 시추된 BH-2는 건조한 상태를 유지하고 있어 수위가 측정되지 않았다. BH-3에서는 함양시험 36시간 전에 실시한 투수시험의 영향으로 3.01m의 수위가 측정되었다.

그림에서 보는 바와 같이 인공수조에 물을 채우고 약 3.4시간 경과한 후 수조에서 가장 가까운 거리(약 2m)에 위치한 BH-3에서 수위가 6.20m까지 급하게 상승하였으며, 이후 수조에서의 수위변화에 반응하여 상승, 하강을 반복하였다. 함양시험 종료 후 수위강하 곡선을 보면 초기에는 급하게 떨어지다가 점차 완만해지는 경향을 보이는데 이는 원지반이 갖는 투수계수의 수직적인 변화를 짐작케 한다. 즉 지표면(11.4m)에서 깊어질수록 지층의 투수성이 감소하는 일반적인 경향을 반영한 것으로 추측된다.

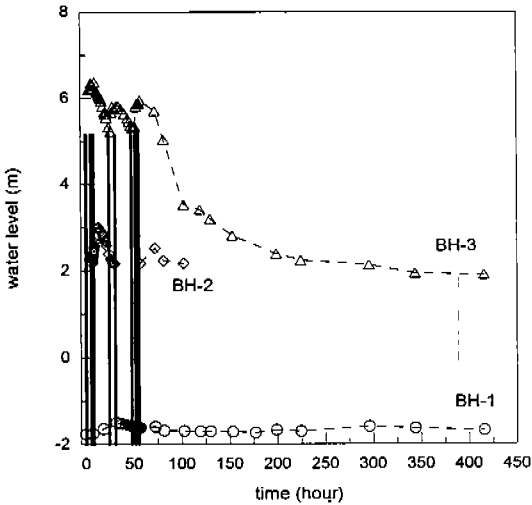


Fig. 9. Water level variations measured in 3 boreholes during the test.

BH-2에서는 6.9시간 경과 후부터 공 내부로 물이 유입되면서 수위가 측정되기 시작하였다. 공 내부로 물이 유입되면 유입된 지점 하부의 공벽은 물에 젖게 되므로 수위 측정시 수위측정기 tape의 젖은 위치를 조사하여 물이 유입되는 구간의 위치를 추정할 수 있다. BH-2의 경우 측정된 수위 상부의 모든 공벽이 건조한 상태에 있는 것으로 관측되었으며 이는 수위 측정 지점 부근으로부터 물이 유입되었음을 알려준다. 시험동안 'BH-2에서도 BH-3에서와 같이 수조에서의 수위변화에 반응하여 수위의 상승, 하강이 반복되었다. 그림에서 나타난 바와 같이 약 80시간 후부터는 BH-2의 수위가 공 하단 이하로 떨어져 측정할 수 없었다.

함양 수조로부터 약 18m의 거리에 위치한 BH-1에서 지하수면의 변화를 보면 시험 중 약 0.2m 상승하여 인공함양의 영향이 비교적 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

#### 고분군 내부에서의 누수 관측

함양 시험 동안 무령왕릉 내부에서 누수가 일어나는지를 관측하였다. 함양시험 수조와 가장 가까운 곳에 위치하는 북측벽체에서는 보다 세밀한 관측이 이루어졌다. 누수 관측은 전등을 이용한 육안 관측과 벽체를 직접 손으로 만져보는 방법을 이용

하였다. 고분군 주변으로 지하수가 유입되는 경우 고분군을 구성하는 벽돌과 벽돌의 연결부인 점토의 함수비가 증가하면서 강도가 떨어지게 되므로 손으로 만져보면 그 변화를 쉽게 알 수 있다. 함양 시험 동안 2-3시간 간격으로 계속 누수 여부를 조사하였으나 시험 전과 비교하여 뚜렷한 변화를 관측할 수 없었다.

#### 시험 결과 분석

이상의 모든 측정 자료를 종합하여 함양수조로부터 불포화대로 침투한 인공함양의 습윤전선(wetting front)의 예상되는 위치와 분포를 Fig. 10에 도시하였다. 습윤전선은 지하로 유입된 물이 불포화대의 함수비를 증가시키면서 이동한 최전선면, 즉 원래의 건조한 부분과 침투한 물에 의해 젖은 부분 경계면을 나타낸다. 그림에 나타난 3개의 시간은 습윤전선의 위치를 간접적으로 지시해주는 다음의 측정자료로부터 설정하였다: 1) 시험 시작 3.4시간 경과 후 BH-3에서 수위가 급하게 상승하였다; 2) 6.9시간 경과 후 BH-2에서 초기 수위가 관측되었다; 3) 15시간 이후 함양률이 비교적 일정하게 유지되었다. 그림에서 보는 바와 같이 15시간 후부터 습윤전선은 더 이상 진행하지 않고 일정한 모양을 유지하고 있다.

Fig. 10은 여름철 집중강우시 발생하는 고분군의 누수현상의 원인을 규명하는 중요한 단서를 제공한다. 본 연구에서 실시한 인공함양시험은 그 규모나 함양량(152cm)을 고려할 때 300mm 이상의 여름철 집중강우 상황을 재현하였다고 판단된다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 여름철 집중강우시 고분군 북측 능선 하부로 침투한 빗물은 불포화대에서 주로 수직 방향으로 이동하여 지하수면으로 유입되며 습윤전선과 무령왕릉의 북측벽체와는 4m 이상의 거리를 유지할 것으로 보여 고분군에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 추측된다. 따라서 고분군 누수현상의 주된 원인은 고분군의 누수방지층에 발생한 균열을 통한 지하수의 직접적인 유입일 것이라 판단된다.



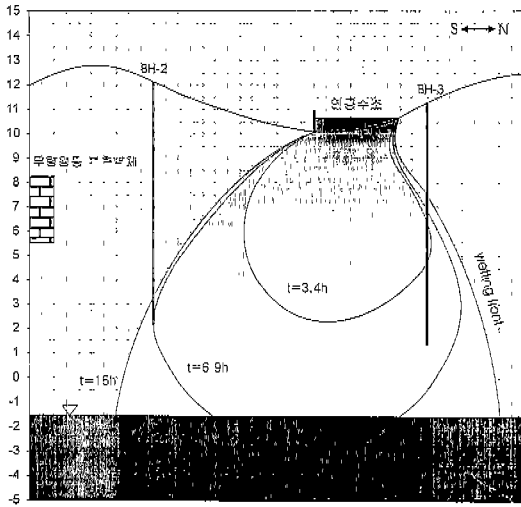


Fig. 10. A schematic diagram showing the location of the wetting front during the test.

### 포화대에서의 지하수 유동

함양시험을 통하여 밝혀진 것처럼 수조에서 불포화대로 침투한 물은 약 15시간 경과한 후부터 -2.5m에 위치하는 지하수면으로 유입되기 시작한다. 유입된 지하수로 인하여 수조 주변에서 지하수면이 상승하고 결과적으로 수두경사에 의하여 포화대에서 방사방향으로 지하수가 유동하게 되리라 예상된다. 따라서 인공수조로부터 지하로 침투한 대부분의 물은 결국 지하수면 아래의 포화대로 유입되고 원래의 지하수와 혼합되면서 고분군 주변으로 서서히 퍼져나갈 것이다.

포화대로 유입된 인공함양수를 추적하기 위하여 시험 시작 후 10일간 BH-1에서 지하수를 취수하여 pH, 전기전도도(EC), 및 산소동위원소비를 측정하였다. 산소동위원소의 분석은 기초과학지원연구소의 안정동위원소 질량분석기를 이용하였으며 분석정밀도는  $\pm 0.1\%$ 이다.

pH, EC, 및 산소동위원소비는 지하수의 화학적 성분 및 농도의 변화를 알려주는 지하수의 특성들로 본 시험에서와 같이 지표수가 빠르게 포화대에 유입되어 원래의 지하수를 대체하거나 혼합을 일으키는 경우 이들의 변화를 관측함으로써 지표수의 유

입을 확인 또는 추적할 수 있다. pH와 EC의 경우 지하로 유입된 물이 지층의 일부 성분들을 용해시키면서 그 값이 변할 수 있으나 본 시험의 경우 함양이 매우 빠르게 일어나므로 인공함양수의 유입에 의한 지하수의 pH와 EC 변화가 잘 나타나리라 예상된다. 산소동위원소비의 경우 지층과의 접촉에 의한 값의 변화가 매우 서서히 일어나므로 인공함양수의 동위원소비가 지하수의 값과 어느 정도의 차이만 있다면 인공함양수의 유입에 의한 지하수 동위원소비의 변화를 측정할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1은 인공함양수와 함양 전 BH-1에서 채취한 지하수의 pH, EC, 및  $\delta^{18}O_{SMOW}$ 를 나타내며, 10일간 채취한 시료에 대한 결과는 Fig. 11과 같다. 그림의 pH 측정자료는 초기에 미약한 증가를 보이는 하지만 전체적으로 EC와 산소동위원소비에 비하여 인공함양수의 유입에 의한 변화를 잘 반영하지 못하는 것으로 보이며, 4번째와 7번째의 부분적인 pH 감소는 5/2일과 5/7일 내린 빗물의 유입에 의한 것으로 판단된다. EC 측정자료는 두 번째 측정점에서 뚜렷한 증가를 보여 인공함양수의 유입에 의한 영향을 잘 반영한 것으로 생각된다.  $\delta^{18}O_{SMOW}$ 의 경우 표Table 1에 나타난 바와 같이

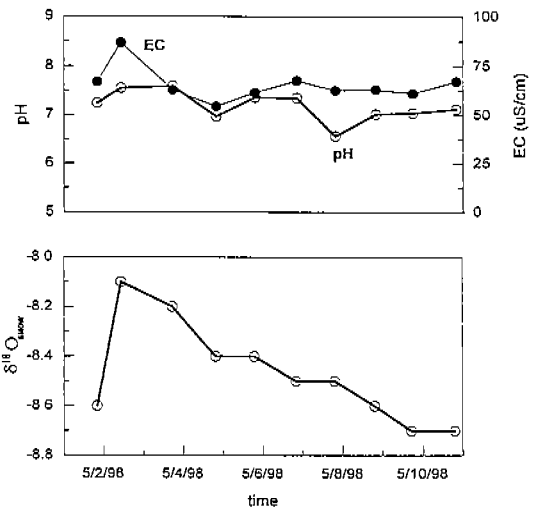


Fig. 11. Variations of pH, EC, and  $\delta^{18}O_{SMOW}$  for saturated groundwater sampled from BH-1 during the test.

인공함양수와 지하수와와의 값의 차이가 크지 않아 인공함양수의 유입을 추적하기가 어려우리라 예상하였으나 두 번째 측정에서 증가하였다가 점차 감소하는 경향을 보여 역시 인공함양수의 유입을 어느 정도 반영하고 있는 것으로 판단된다. 바닷물과 같이 고분균 지하수와 동위원소비가 크게 다른 물을 시험에 이용하였다면 더욱 뚜렷한 결과를 보였을 것이다.

Table 1. pH, EC, and  $\delta^{18}O_{SMOW}$  for the fire water and groundwater of BH-1 sampled before the test

	pH	EC ( $\mu S/cm$ )	$\delta^{18}O_{SMOW}$
소방수	7.66	176.4	-8.3
BH-1	7.34	66.9	-8.6

### 인공함양시험 수치모델링

앞에서 실시한 인공함양시험 동안 불포화대에서의 함수비 또는 압력수두의 변화를 알아보기 위하여 인공수조에서 무령왕릉을 가로지르는 남북 방향의 2차원 단면에 대한 수치모델링을 실시하였다.

#### 지배식: Richards' equation (RE)

RE는 Darcy 법칙에 근거하여 불포화대에서의 지하수의 유동을 나타내는 미분방정식으로 종속변수(dependent variable)의 유형에 따라 다음과 같이 h-형(h-based form),  $\theta$ -형( $\theta$ -based form), 및 혼합형(mixed form)으로 표현된다(Celia et al., 1990):

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot K(h) \nabla h + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot D(\theta) \nabla \theta + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot K(h) \nabla h + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (4)$$

여기서  $C(h) = d\theta/dh$ , 즉 비함수용량(specific

moisture capacity)을 나타내며,  $K(h)$ =불포화투수 계수,  $D(\theta) = K(\theta)/C(\theta)$ ,  $h$ =압력수두,  $\theta$ =함수비를 나타낸다. RE는 위 식에서 표현된 바와 같이 비선형방정식이므로 매우 특별한 조건에 대하여만 해석학적인 해(analytical solution)가 존재하며 (Barry et al., 1993; Tracy, 1995), 일반적으로 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM) 등과 같은 수치해석적인 방법으로 그 해를 구하게 된다.

수치해석적인 방법에서 h-형 방정식은 불포화대 및 포화대에서의 지하수의 유동을 나타내는 방정식으로 널리 사용되고 있으나 불포화대의 문제에서는 식 (2)의  $C(h)$ 가 갖는 고비선형성 때문에 질량평형의 불량(poor mass balance), 시간간격의 제한(time step limitation) 등과 같은 문제점을 갖는 것으로 알려졌다(Milly, 1985; Celia et al., 1987).

반면 Hills et al. (1989)과 같이 식 (3)의  $\theta$ -형 방정식을 이용한 수치 모델의 경우 h-형의 문제점들이 크게 개선되는 장점을 보이거나, 포화대에서 사용될 수 없으며, 층상구조와 같이 매질의 불연속면이 존재하는 경우 불연속을 나타내는  $\theta$  값에 대한 특별한 처리가 요구되는 단점 때문에 일반적으로 사용되지 않는다(Pan and Wierenga, 1995).

식 (4)의 혼합형 방정식은 h-형과  $\theta$ -형이 갖는 각각의 단점을 보완한 것으로, Celia et al. (1990)은 피카드반복법(Picard iteration method)을 이용하여 h-형과 혼합형의 수치 모델 결과를 비교하였으며 불포화대의 지하수 유동 문제를 해결하는 적절한 방정식으로 혼합형을 제시하였다. Pan and Wierenga (1995)는 Celia et al. (1990)의 수치해석적인 방법을 변형된 h-형 피카드 모델(h-based modified Picard model)이라 하였다.

본 연구에서는 인공함양시험을 모사하기 위하여 혼합형 방정식을 이용한 2차원 불포화 지하수 유동 수치모델을 개발하였다.

#### 수치해석적 방법 (Numerical Method)

2차원의 혼합형 RE에 피카드반복법에 의한 후진 Euler 근사식(backward Euler approximation)을 적용하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\theta^{n+1, m+1} - \theta^n}{\Delta t} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K^{n+1,m} \frac{\partial h^{n+1,m+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K^{n+1,m} \frac{\partial h^{n+1,m+1}}{\partial z} \right) + \frac{\partial K^{n+1,m}}{\partial z} \quad (5)$$

위 식에서 n=시간단계(time level), m=반복단계(iteration level)를 나타낸다. 식 (5)의  $\theta^{n+1,m+1}$ 을  $h$ 에 대하여 테일러급수(Taylor series)로 전개하면 다음 식과 같다.

$$\theta^{n+1,m+1} = \theta^{n+1,m} + \left( \frac{d\theta}{dh} \right)^{n+1,m} (h^{n+1,m+1} - h^{n+1,m}) + O(\delta^2) \quad (6)$$

$\delta^m = h^{n+1,m+1} - h^{n+1,m}$ 로 정의하고 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 다음의 변형된 혼합형 피카드 근사식(mixed form modified Picard approximation)이 구해진다.

$$\left( \frac{C^{n+1,m}}{\Delta t} \right) \delta^m - \frac{\partial}{\partial x} \left( K^{n+1,m} \frac{\partial \delta^m}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( K^{n+1,m} \frac{\partial \delta^m}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( K^{n+1,m} \frac{\partial h^{n+1,m}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K^{n+1,m} \frac{\partial h^{n+1,m}}{\partial z} \right) + \frac{\partial K^{n+1,m}}{\partial z} - \frac{\theta^{n+1,m} - \theta^n}{\Delta t} \quad (7)$$

위 식의 공간영역 (x,y)에 유한차분식을 적용하면,

$$\left( \frac{1}{\Delta t} C_{i,j}^{n+1,m} \right) \delta_{i,j}^m - \frac{1}{(\Delta x)^2} [K_{i+1/2,j}^{n+1,m} (\delta_{i+1,j}^m - \delta_{i,j}^m) - K_{i-1/2,j}^{n+1,m} (\delta_{i,j}^m - \delta_{i-1,j}^m)] - \frac{1}{(\Delta z)^2} [K_{i,j+1/2}^{n+1,m} (\delta_{i,j+1}^m - \delta_{i,j}^m) -$$

$$K_{i,j-1/2}^{n+1,m} (\delta_{i,j}^m - \delta_{i,j-1}^m)] = \frac{1}{(\Delta x)^2} [K_{i+1/2,j}^{n+1,m} (h_{i+1,j}^{n+1,m} - h_{i,j}^{n+1,m}) - K_{i-1/2,j}^{n+1,m} (h_{i,j}^{n+1,m} - h_{i-1,j}^{n+1,m})] + \frac{1}{(\Delta z)^2} [K_{i,j+1/2}^{n+1,m} (h_{i,j+1}^{n+1,m} - h_{i,j}^{n+1,m}) - K_{i,j-1/2}^{n+1,m} (h_{i,j}^{n+1,m} - h_{i,j-1}^{n+1,m})] + \frac{K_{i,j+1/2}^{n+1,m} - K_{i,j-1/2}^{n+1,m}}{\Delta z} - \frac{\theta_{i,j}^{n+1,m} - \theta_{i,j}^n}{\Delta t} \equiv (R_{i,j}^{n+1,m})_{MPFD} \quad (8)$$

식 (8)의 오른쪽 항은 피카드반복법에 의한 유한차분식의 잔류(residual) 오차를 나타내므로 (n+1) 시간단계에서의 근사해는  $\delta^m$ 과  $(R_{i,j}^{n+1,m})_{MPFD}$ 가 동시에 0에 수렴하도록 함으로써 구해진다. 식 (8)의 중간 격자점에서의  $K$ 값은 양 격자점 값의 산술평균을 이용하여 계산하였다.

$$K_{i,j+1/2}^{n+1,m} = (K_{i,j+1}^{n+1,m} + K_{i,j}^{n+1,m})/2 \quad (9)$$

#### 구성 관계식(constitutive relations)

RE의 해를 구하기 위해서는 지하수의 압력수두 변화에 따른 포화도(saturation) 및 불포화투수계수의 변화를 나타내는 구성 관계식이 요구된다. 본 연구에서는 불포화대의 지하수 모델에서 널리 인용되는 van Genuchten(1980)과 Mualem(1976)의 구성식을 사용하였다. 전자는 압력수두에 대한 포화도의 변화를, 후자는 포화도에 대한 불포화투수계수의 변화를 나타내는 구성식으로 다음과 같다.

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|)^{-m} \quad (h \leq 0) \quad (10)$$

$$K(S_e) = K_s \sqrt{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (11)$$

여기서  $S_e$ =유효포화도(effective saturation),  $\theta_r$ =잔류함수비(residual volumetric water cont-

ent),  $\theta_s$  = 포화함수비(saturated volumetric water content),  $K_s$  = 포화투수계수(water-saturated hydraulic conductivity),  $m = 1 - 1/n$  을 나타내며  $n$  과  $\alpha$  는 공극의 균질도 및 평균공극의 크기와 관련된 피팅인자(fitting parameters)이다.

식 (8)에서 비함수용량은  $C(h) = d\theta/dh$ 로 정의되므로 구성식 (10)의 도함수를 이용하여 계산하였다.

$$C(h) = \frac{(\theta_s - \theta_r)(n-1)|h|^{n-1}\alpha^n}{(1+|\alpha h|^n)^{m+1}} \quad (12)$$

**개념모델(conceptual model)의 설정**

Fig. 12에 도시한 바와 같이 30m×11.5m의 2차원 단면을 모델 영역으로 설정하였으며 매질의  $K_s$  는 균질, 등방하다고 가정하였다. 실제 고분군에서의 시추자료를 보면 수직, 수평적인 압층의 변화가 존재하므로 균질성을 가정하는 것은 무리가 있으나 뒤에서 논의될 모델 보정에서의 보정 인자들의 수의 최소화를 위하여 균질성을 가정하는 것은 불가피한 것으로 판단되었다.

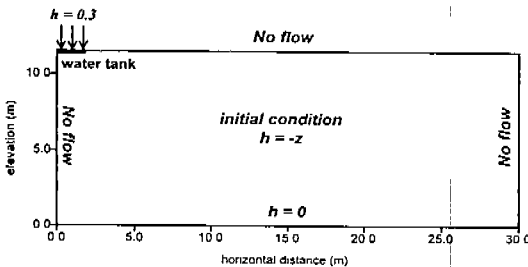


Fig. 12. Boundary and initial conditions of the conceptual model.

모델 영역의 하단은 지하수면을 나타내며  $z = 0$  으로 설정하였다. 모델 영역의 상단은 고분군의 지표면을 나타내며 인공수조가 설치된 지점의 표고를 기준으로 수평 하다고 가정하였다. 좌측 경계면 ( $x = 0$ ) 은 인공수조를 남북으로 가르는 축선의 중앙점에 해당하며, 이 점으로부터 남쪽으로 30m 지점을 우측 경계면으로 설정하였다. 30m의 수평규모는 실제 고분군의 지형과는 무관하며 인공

함양의 영향권을 포함하도록 설정한 임의의 값일 뿐이다.

경계조건은 Fig. 12와 같으며 지표면  $0 \leq x \leq 1.5$ 에서의 경계조건은 함양시험 동안의 평균 수조수위를 고려하여 다음과 같이 설정하였다.

$$h \quad (0 \leq x \leq 1.5 \text{ m}, y = 11.5 \text{ m}) \\ = 0.3 \text{ m} \quad (0 \leq t \leq 3.5 \text{ days}) \quad (13)$$

초기조건은 함양시험 전 모델 영역의 압력수두의 분포가 정상상태에 있다고 가정하여 다음의 식을 적용하였다.

$$h(x, z) = -z \quad (t = 0) \quad (14)$$

**모델 보정(calibration) 및 예측**

모델 보정이란 모사(simulation)에 사용되는 여러 모델변수들의 값을 변화시키면서 현장 측정치를 재현하는 과정을 말한다. 본 모델에서 결정되지 않은 모델변수로는 구성식에서 사용된 피팅인자들( $n$  과  $\alpha$ ), 잔류함수비( $\theta_r$ ), 포화함수비( $\theta_s$ ), 및 포화투수계수( $K_s$ )이다.  $\theta_r$  과  $\theta_s$  는 식 (12)에서 두 값의 차, 즉  $(\theta_s - \theta_r)$ 이 입력변수로 사용되므로 실제 보정에서 결정해야될 모델변수는  $n$ ,  $\alpha$ ,  $(\theta_s - \theta_r)$ ,  $K_s$ 이다.

시행착오법을 이용하여 모델변수들에 대한 보정을 수행하였는데, 인공함양시험 중 관측점에서 측정된 수위변화 및 인공수조에서의 함양량의 측정치가 모사치와 일치하도록 모델변수를 결정하였다. 먼저  $n$  과  $\alpha$  값에 대한 보정을 위하여 정류상태(steady state) 모사를 실시하였으며 BH-2 하단에 습윤전선이 위치하도록  $n$  과  $\alpha$  를 결정하였다. 함양시험동안 BH-2 하단에서 지하수가 유입되어 수위가 측정되었으므로 공 하단의 유효포화도가 거의 1에 가까우리라 예상된다. 따라서 임의적이기는 하지만 정류상태 모사에서 유효포화도가 0.9 이상인 경우에 지하수의 공내 유입이 가능하다고 가정하였다. 다음으로  $(\theta_s - \theta_r)$  및  $K_s$  값의 보정을 위하여 정류모사에서 결정된  $n$  과  $\alpha$  값을 이용하여 부

정류상태(transient state) 모사를 실시하였으며 인공수조에서 측정된 함양량의 변화(Fig. 7)가 모사치와 일치하도록 ( $\theta_s - \theta_r$ )과  $K_s$  값을 결정하였다. 본 연구에서는 자동보정(automated calibration)이 아닌 시행착오법에 의해 모델변수들을 결정하였으므로 어느 정도의 임의성과 주관성이 내포되어 있음을 밝혀둔다. 위의 보정과정을 통하여 산정된 모

델변수는 Table 2와 같다.

Table 2. Calibrated model parameters

$n$	$\alpha [m^{-1}]$	$(\theta_s - \theta_r)$	$K_s [m/day]$
2	0.18	0.2	0.3

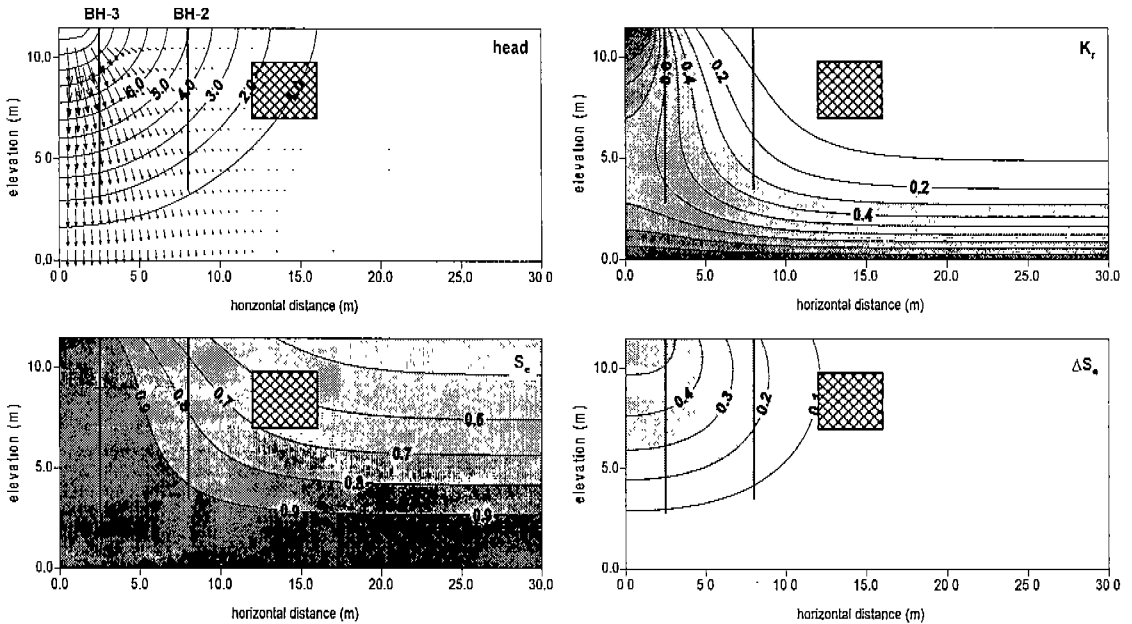


Fig. 13. Results of the steady state simulation by the calibrated fitting parameters.

정류모사 결과 계산된 수두, 상대투수계수 ( $K_r = K/K_s$ ), 유효포화도 ( $S_e$ ), 및 유효포화도 변화 ( $\Delta S_e$ )는 Fig. 13과 같다.  $\Delta S_e$ 는 함양시험 전과 함양시험 후 정류상태의 유효포화도의 변화를 나타내는데 무령왕릉 북측벽체에 약 10% 정도의 유효포화도 증가가 있음을 알 수 있다. 부정류모사에 의한 함양량의 변화와 측정치는 Fig. 14와 같으며 모사치와 측정치가 전체적으로 잘 일치하고 있음을 보여준다. 단 식 (13)의 개념모델 경계조건에서는 수조의 시간에 따른 수위변화를 무시하였으므로 측정치의 단기적인 변동은 모사치에서 재현할 수 없었다.

이상의 모델보정을 통하여 구한 모델변수들을 사용하여 함양시험의 전 과정을 모사하였으며 그 결과는 시간에 따른 비유출량의 변화를 절대값으로

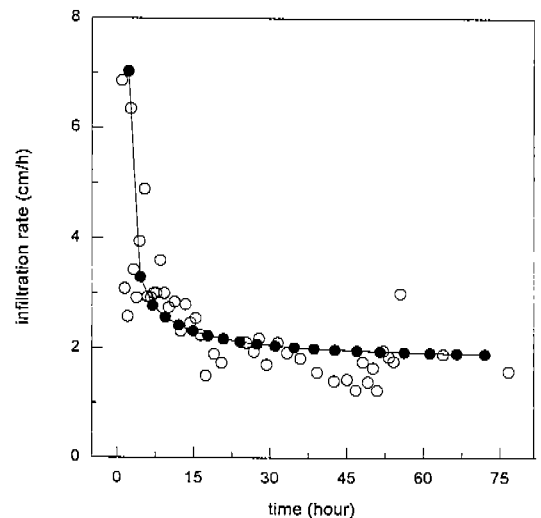


Fig. 14. Comparison of the measured and simulated infiltration rates.

Fig. 15에 나타내었다. 3.5일간의 함양시험은 여름철 집중강우시의 상황을 충분히 재현하였으리라 판단되며 Fig. 15에서와 같이 고분군 북측의 원지반에 침투한 지하수의 불포화대에서의 수평적인 이동에 의한 무령왕릉으로의 지하수의 유입은 거의 없는 것으로 추정된다. 단 장기간 강우가 지속되는 경우 정류모사에서 밝혀진 바와 같이 왕릉 북측 벽체 부근에서는 10% 내외의 유효포화도 증가를 초

래할 가능성이 있을 것으로 추측된다. 결론적으로 여름철 집중강우시 관찰되는 고분군 누수현상의 주된 원인은 고분군 상부의 누수방지층에 발생한 균열을 통한 지하수의 직접적인 유입에 의한 것이며 능선 상부로부터의 지하수 유입을 차단하기 위한 유도배수시설 또는 차단벽의 설치는 불필요하다고 판단된다.

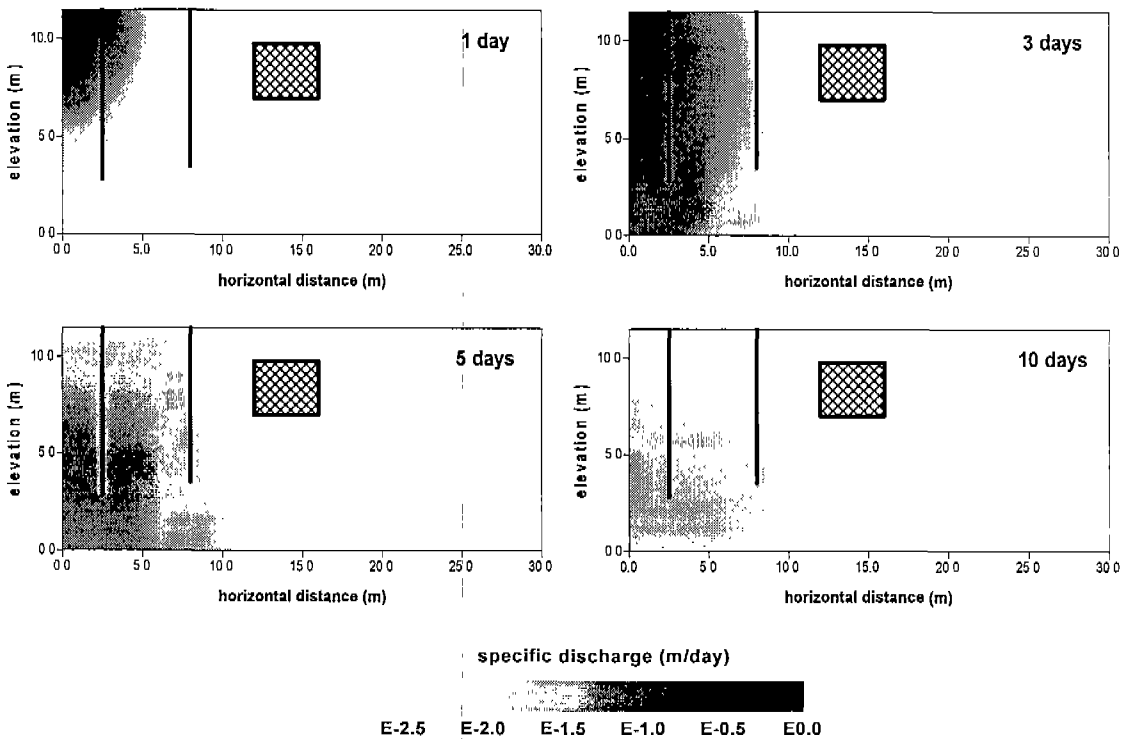


Fig. 15. Results of the transient simulation by the calibrated model parameters given in Table 2.

## 결론

1. 불포화대에 시추된 BH-2, BH-3에서 투수시험을 실시하였다. 고분군 축조 과정에서 만들어진 다짐층(BH-2)의 투수계수가 풍화암으로 구성된 원지반(BH-3)보다 투수계수가 작으며, 이는 1997년 4월부터 9월까지 두 공에서 관측한 수위변화 자료와 일치한다.

2. 고분군 북측 능선에 수조를 설치하고 소방차를 동원하여 인공함양시험을 실시하였다. 시험 시작 후 약 15시간이 경과한 후부터는 비교적 일정한 함양물을 보여 습윤전선이 수직적으로는 지하수면에 이르렀으며, 수평적으로는 더 이상 진행하지 못하는 것으로 판단된다. 함양시험 동안 무령왕릉 내부에서 누수현상을 관측할 수 없었다.

3. 함양시험에 의해 포화대로 유입된 물은 BH-1에서의 EC 및 산소동위원소비의 변화를 통하여 간

접적으로 확인할 수 있었다.

4. 2차원 불포화 지하수 유동 수치모델을 개발하고 모델변수의 보정을 통하여 구한 모델변수를 이용하여 함양시험의 전 과정을 모사하였다. 개념 모델에서 설정한 매질 균질성 가정의 불합리성, 초기 조건 및 경계조건의 단순화, 구성식의 적용성 여부 등 여러 가지 문제점을 가지지만 본 연구에서 실시한 수치모델링 결과는 송산리고분군 누수현상의 원인을 분석하는 유용한 도구로 사용될 수 있으리라 판단된다. 모사 결과에 의하면 장기간 강우가 지속되어도 고분군 북측의 원지반에 침투한 지하수의 무령왕릉으로의 유입 가능성은 희박한 것으로 보이며, 왕릉 북측 벽체 부근에서 10% 내외의 유효포화도 증가만을 일으킬 것으로 분석된다.

5. 이상의 실험을 종합할 때 고분군 누수현상의 주된 원인은 상류구배로부터 불포화대를 통한 지하수의 유입보다는 고분군 상부에 설치된 강회다짐층에 발생한 균열을 통한 지하수의 수직적인 침투 때문인 것으로 판단된다. 따라서 누수방지 대책으로는 트렌치에 의한 유도배수시설보다는 고분군 상부에 효과적인 누수방지층의 보강이 더 시급히 요구된다.

## 사 사

본 연구는 문화재 관리국, 충청남도 공주시 및 공주대학교 기초과학연구소의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

서만철, 1997, 송산리고분군의 현황과 보존대책, 공주대학교 기초과학연구소, 공주시, 충청남도.  
 서만철, 박은주, 1997, 경사도변화 계측을 통한 백제 송산리 고분군의 지하 벽체거동특성과 안정성, 대한지질공학회지, 7(3), 191-205.  
 Barry, D.A., J.Y. Parlanga, G.G. Sander, and M. Sivlapan, 1993, A class of exact solutions for Richards' equation, J. Hydrol., 142, 29-46.  
 Celia, M.A., E.T. Bouloutas, and R.L. Zarba, 1990, A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation,

Water Resour. Res., 26, 1483-1496.  
 Celia, M.A., L.R. Ahuja, and G.F. Pinder, 1987, Orthogonal collocation and alternating-direction procedures for unsaturated flow problems, Adv. Water Resour., 10, 178-187.  
 Hills, R.G., I. Porro, D.B. Hudson, and P.J. Wierenga, 1989, Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils, 1. Model development and evaluation, Water Resour. Res., 25, 1259-1269.  
 Milly, P.C.D., 1985, A mass-conservative procedure for time-stepping in models of unsaturated flow, Adv. Water Resour., 8, 32-36.  
 Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res., 12, 513-522.  
 Pan L., and P.J. Wierenga, 1995, A transformed pressure head-based approach to solve Richards' equation for variably saturated soils, Water Resour. Res., 31, 925-931.  
 Tracy, F.T., 1995, 1-D, 2-D, and 3-D analytical solutions of unsaturated flow in groundwater, J. Hydrol., 170, 199-214.  
 van Genuchten, M.T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.

구민호, 서만철

공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과

314-701 충남 공주시 신관동 182

Tel: 0416-850-8515, 0416-850-8512

Email:koo@knu.kongju.ac.kr, mcsuh@knu.kongju.ac.kr