

무령왕릉 고분군의 세부 응력장 모델링을 통한 응력 및 변위의 평가

허덕기^{1)*} · 김영석¹⁾ · 서만철¹⁾

1. 서론

무령왕릉을 포함한 송산리 고분군은 삼국사기 및 동국여지승람의 사료를 확인시켜준 유일한 유적으로 그 보전이 매우 중요한 문화유산이다. 이에 서만철 등(1997)은 송산리 고분군에 대한 정밀조사를 하여 발굴 후에 심각한 문제로 야기되고 있던 누수 및 벽체의 거동에 대한 연구를 수행하고 이에 의거한 보수공사가 행해졌다. 이후에 고분군은 일반인의 관람이 제한된 상태로 유지되고 있다. 본 연구에서는 보수공사 후 고분군의 벽체를 포함한 구조물의 안정성이 어떠한 상태에 있는지 수치모델링을 이용하여 확인, 평가하고자 한다. 이 연구를 위하여 실측데이터를 바탕으로 구조모델 프로그램인 AutoCAD 및 Solidworks를 이용하여 3차원 격자구조 생성하고, 유한요소법 프로그램인 Comsol Multiphysics 패키지를 이용하여 고해상도 메쉬(mesh)를 구성하여 이를 입력인자로 하여 응력장 및 변위를 계산하였다.

2. 수치모델링

2-1. 3차원 모델 및 메쉬구조 생성

3차원 모델 생성은 실측데이터를 기반으로 AutoCAD, Solidworks 등의 구조생성 프로그램을 이용하여 정확한 3차원 격자구조를 생성하였다. Fig. 1은 실측데이터로부터 얻어진 선요소(line element)로 이루어진 와이어프레임(wireframe) 모델(a)과, 이를 이용하여 곡면 모델을 생성하고, 다시 솔리드 모델로의 변환과정 통해 만들어진 무령왕릉의 3차원 모델(b)을 보여주고 있다. 이러한 일련의 작업을 통하여 보다 효율적으로 실측데이터에 근거한 정확한 모델의 생성이 가능하며, 공학에서만 주로 사용되던 전문 구조모델링 프로그램을 이용하여 문화재와 같은 지질구조물에 효율적으로 응용이 가능함을 보여준다. 이러한 3차원 솔리드 모델을 이산화(discretization)과정을 거쳐 유한요소법(finite-element method)의 입력변수로 사용할 수 있는 3차원 메쉬구조를 생성하였다.

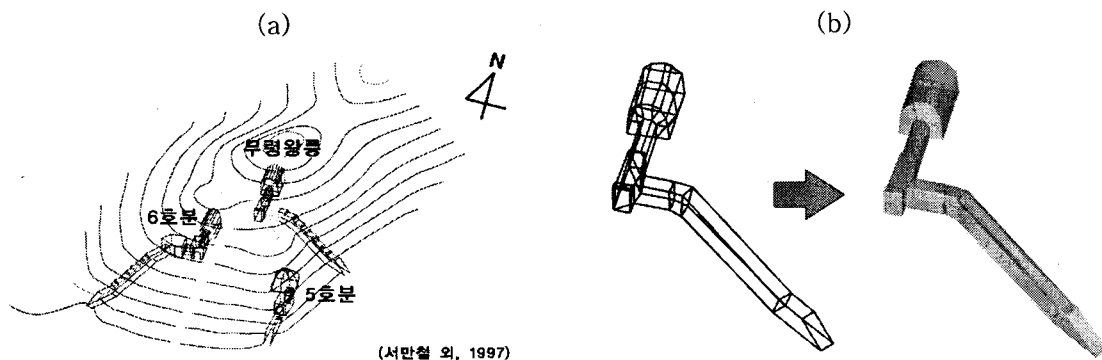


Fig. 1. (a) 무령왕릉 고분군의 실측 AutoCAD 데이터. (b) SolidWorks를 이용하여 생성한 3차원 면구조 및 솔리드 모델.

주요어 : 무령왕릉, 응력장, 변위, 유한요소법, 3차원 격자구조

1) 공주대학교 지질환경과학과 (hudocki@kongju.ac.kr)

2-2. 세부 응력장 시뮬레이션

앞에서 얻어진 3차원 격자구조를 바탕으로 유한요소법 프로그램 패키지인 Comsol Multiphysics를 이용하여 세부 응력장 시뮬레이션을 수행하고 이 결과를 이용하여 응력장 및 변위량을 계산하였다. COMSOL Multiphysics는 다양한 유한요소법 모델링(구조역학, 화학, 전자기, 열전달, MEMS)에 폭넓게 사용될 수 있는 신생 소프트웨어로 메쉬모델의 생성, 다양한 pre-conditioner 와 solver 및 3차원 구상화(visualization)기능까지 갖춘 통합 환경을 제공하는 소프트웨어이다. 이것의 보다 큰 강점은 여러 가지 지배식(governing equation)이 연결된 (coupled) 복잡한 문제를 쉽게 풀 수 있다는 데 있다. 본 연구에서 수행한 수치 시뮬레이션은 다음 세 가지 과정으로 나누게 된다. 가장 먼저, 전처리과정에서는 mesh(요소 및 절점)의 생성, 경계조건(구속조건과 하중데이터), 재료특성(각 도메인의 물성값 등)과 그 외의 물리특성 등의 입력변수를 결정하는 단계이다. 두 번째는 실제로 수치계산을 수행하는 단계로 여러 가지 pre-conditioner 와 solver의 조합을 이용하여 보다 효율적이고 정확한 계산을 할 수 있도록 다양한 시도를 하였다. 세 번째의 후처리 과정에서는 계산결과를 알기 쉬운 형식으로 가공하여 나타내고, 해석결과의 검증과 모델의 타당성을 체크하기 위해 데이터를 가시화 (visualization)하였다. Fig. 2에서는 계산에 사용된 3차원 메쉬구조와 계산결과 중 응력의 분포를 여러 단면요소로 구상화한 그림을 보여주고 있다.

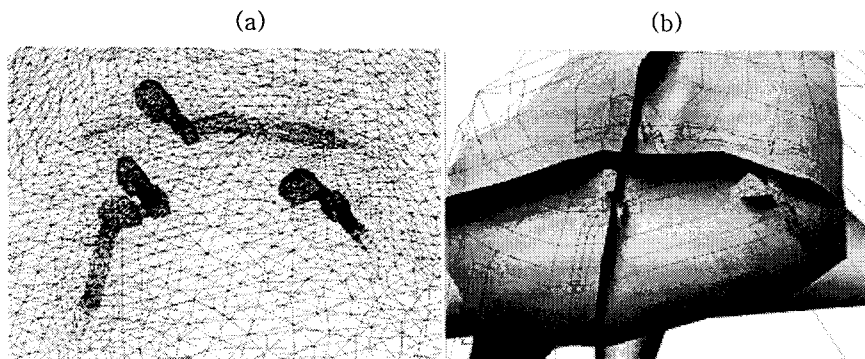


Fig. 2. (a) 송산리 고분군의 3차원 메쉬 구조. (b) 세부 응력장 시뮬레이션 결과.

3. 결과의 해석

3-1. 무령왕릉의 변위해석

세부 응력장 시뮬레이션은 Fig. 2에서 보듯이 무령왕릉 고분군 전체를 대상으로 하였다. 그 이유는 한 고분만을 위한 3차원 모델을 만들 경우 주변 고분군의 영향을 배제한 해석 결과가 나올 수 있으며 경계조건에 따른 오차가 매우 크기 때문이다. Fig. 3에서 무령왕릉 고분의 벽면에서의 변위 양상을 살펴보면 전체적으로 약간 비대칭적인 양상을 보이나 안정성에는 큰 문제가 없는 것으로 생각된다. 변위의 값도 그다지 크지는 않는데 이는 탄성학에 입각한 정적(steady-state)해이기 때문이다. 보다 정확한 변위의 해석은 시간의 존적인 해를 포함할 수 있는 plastic deformation에 대한 연구가 수행되어야 한다고 생각된다.

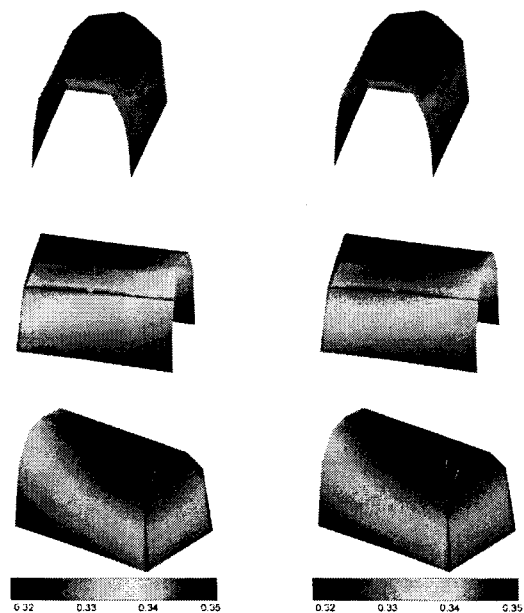


Fig. 3. 무령왕릉의 변위 해석 결과

3-2. 무령왕릉의 응력장 해석

응력장의 표현은 주응력의 차이, 즉 응력상태의 불안정성을 잘 나타낼 수 있는 아래의 식에 주어진 Von mises stress를 이용하였다

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Fig. 4에서 살펴보면 응력은 주로 벽면의 하단부에 집중되어 나타나고 있으며 천정과 벽면상단이 만나는 부분도 비교적 높은 값을 보이고 있다. 이는 먼 구조들이 서로 각을 이루고 있는 부분으로 응력의 집중이 예상되는 부분이다. 하지만 좌우 벽면의 값 분포가 대칭 양상을 보이고 있어 응력 차이의 편중현상은 적게 나타나고 있기 때문에 비교적 안정한 상태에 있다고 볼 수 있다. 결과적으로 현재의 무령왕릉의 응력장의 상태로 판단하면 그 안정성에는 큰 문제가 없으며, 후에 있는 진단작업 시 벽체와 아치형 천정이 만나는 부분에 대해 보다 정밀한 조사가 요구된다.

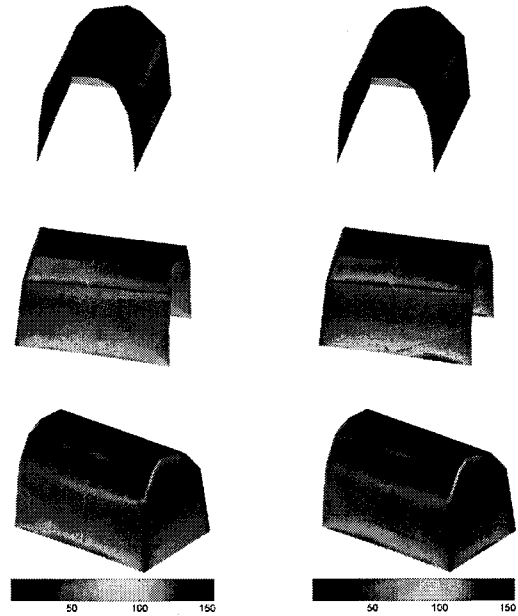


Fig. 4. Von Mises Stress 해석 결과.

4. 결론

무령왕릉 고분군의 세부 응력장 시뮬레이션을 실측데이터와 AutoCAD, SolidWorks의 소프트웨어를 이용하여 3차원 격자구조를 생성하고, 유한요소법을 이용한 COMSOL Multiphysics로 응력장 및 변위를 계산하였다. 무령왕릉의 경우는 벽면의 응력장이 일부 비대칭적인 분포를 보이나, 안정성에 큰 문제는 없는 것으로 나타났다. 변위에 대한 해석에서는 시간의존적 수치해석, 즉 plastic deformation이 포함된 시뮬레이션을 수행하면 보다 유용한 변위정보를 얻을 수 있으리라 생각된다. 지면관계상 본문에서는 언급하지 못했지만 고분군 중의 하나인 5호분의 경우는 수치계산 결과 벽체 가운데 부분에 응력 및 변위의 편중현상이 심하게 나타났으며, 이는 실제 현장에서도 육안으로 확인이 가능하였다. 따라서 고분 보존 대책수립 시 무령왕릉 보다는 5호분의 보수 및 보존에 더 중점을 두어야 하며, 5호분의 변위의 영향이 무령왕릉에 어떻게 작용하는 지에 대한 후속연구도 필요하리라 생각된다. 끝으로 본 연구에서 사용된 실측데이터를 이용한 3차원 격자구조의 생성 및 유한요소법에 의한 세부응력장 수치계산의 방법은 앞으로 다른 연구에서도 응용성이 매우 높다.

참고문헌

- Huges, T.J.R., 2000, The Finite Element Method, Dover Publication.
- 김성균 외, 1994, 지질공학원론, 교학사.
- 김영석 외, 2006, 송산리 고분의 암반코어 물성측정 및 응력장 모델링, 백제문화 원형특화사업 인력양성사업단.
- 김중현. 류재호, 2003, 쉽게 배우는 SolidWorks, 과학기술사.
- 백제 무령왕릉의 보존대책, 1997, 문화재안전과학연구회, 공주대 기초과학연구소, 공주대 방재연구센터.
- 송산리 고분군 지질조사용역보고서, 1997, 공주대 기초과학연구소.
- 서만철 외, 2000, 송산리 고분군의 보존현황, 충남 공주시.
- 서만철 외, 1997, 송산리 고분군의 현황과 보존대책, 공주대기초과학연구소, 충남 공주시.
- 이건우, 2001, 컴퓨터그래픽과 CAD, 영지문화사.