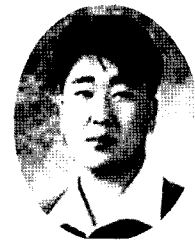


조적식 석탑의 구조모델링 및 해석기법

Structural Modelling and Analysis Method of Masonry Stone Pagoda



김 호 수*
Kim, Ho-Soo



홍 석 일**
Hong, Souk-II

1. 서 론

1.1 개요

우리나라에는 과거로부터 내려온 역사적으로 매우 중요한 조적식 석탑들이 많이 남아있다. 이러한 역사적인 조적식 석탑의 보전 및 복원을 위해 구조적 안전성 평가가 매우 필요하나 건축 구조적 측면에서 조적식 석탑에 대한 해석방법이 명확하지 않아 큰 어려움을 겪고 있으며, 이에 대한 전문적인 연구가 필요한 실정이다. 조적식 석탑은 근본적으로 연속체와 다른 역학적 거동을 나타내기 때문에 불연속체로서 다루어져야한다. 특히 조적식 석탑의 모델링시 블록구성 모델은 강제 또는 변형할 수 있는 재료로써 거동되어야 하며, 또한 절리면에 대한 거동, 구조적 부재들과 복잡한 건물들의 모델링 및 훼손된 구조물과 강제블록 동적해석에 있어 변화성을 잘 표현하여야 한다. 따라서 이를 반영할 수 있는 개별요소 해석프로그램인 3DEC1) 프로그램을 사용하게 되는데, 3DEC 프로그램은 불연속체 모델의 해

석을 위해 개별요소법을 사용하는 3차원 수치해석 프로그램으로써 모델링시 블록들을 하나하나 쌓아서 만들게 되는 블록구성 모델과 블록구성 모델 사이의 경계면을 이루고 있는 절리면 모델을 이용하게 된다.

본 연구는 기존의 석탑형식을 단순화한 일반적인 조적식 석탑을 개별요소법을 이용하여 모델링하고, 개별요소해석 프로그램인 3DEC을 통해 구조해석을 수행하여, 조적식 석탑에 대한 구조모델링 및 해석 기법을 제안하고자 한다.

1.2 조적식 석탑의 구조형식

한국의 석탑은 불교문화와 더불어 그 시대의 시대성을 반영시키면서 다양한 석탑양식의 발달을 가져왔다. 한반도 전체에 현존하는 석탑이 약 1000여기(基)에 이를 정도로 당시 융성했던 불교문화를 말하여 주고 있다. 한국의 석탑은 이렇듯 많은 수뿐만 아니라 그 규모와 형태적으로 매우 다양함을 보여주고 있어 한국석탑의 일반적인 양식을 말하긴 어려우나, 석탑을 평면적으로 볼 때는 방형탑이 거의 대부분을 차지하고 있어, 이것이 가장 일반적인 양

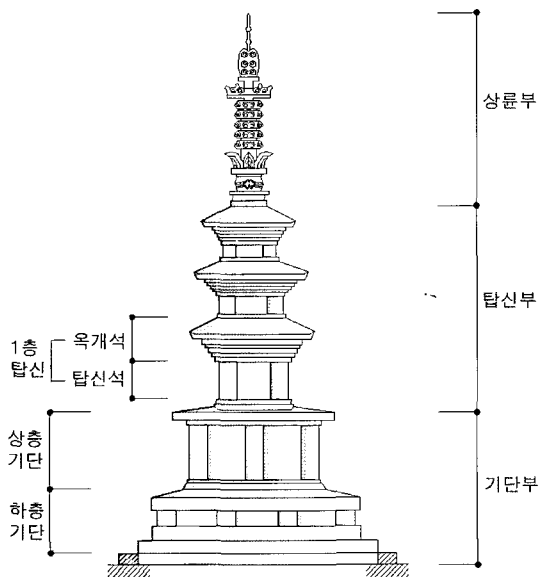
* 정회원, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 청주대학교 산업과학연구소 연구원, 공학박사

식으로 볼 수 있다. 다음으로는 그 평면이 육각형, 팔각형으로 된 것도 많이 존재하고, 간혹 원형이나 직각다각형의 평면을 갖는 탑도 볼 수 있다.

석탑의 층수는 기단부와 상륜부를 제외한 탑신부의 탑신석과 옥개석을 하나의 단위로 하여 1층이라 하는데, 석탑은 3층 이상의 홀수 층으로 이루어지며, 대부분이 3층이며 경우에 따라 5층, 7층 9층 석탑이 조성되어 사찰 가람의 중심공간에 배치되었다. 고대시대에는 대부분의 석탑이 3층이나 5층으로 조성되며 고려와 조선시대에 와서는 탑의 층수도 3층 석탑이 많이 건립되지만 동시에 7층이나 9층 이상의 다층석탑이 많이 건립되었다. 그 층수를 보면 3층, 5층으로 된 것이 가장 많으며, 또 7층, 9층 13층으로 된 것도 많이 볼 수 있다.

재료면에서 볼 때 한국의 석탑은 같은 석재라 하여도 그 종류가 매우 다양하고, 그 중 대부분은 양질의 화강암으로 이루어졌으며 간혹 청석, 안산암 또는 대리석을 사용한 탑도 볼 수 있다. 한국의 석탑중 가장 일반적인 방형탑의 세부구성형식을 살펴보면 <그림 1>과 같이 지반상에 1층 또는 2층의 기단이 놓이며 그 위에 같은 모양의 탑신을 적당하게 그 폭과 높이를 줄여가면서 중첩하여 올리고 최상부에는 탑의 상징이 되는 상륜이 놓여진다. 기단부나 각층 탑신부의 구성은 수개의 판석이나 단일석을 사용하여 규칙적으로 조합하고 있으며 그 이음



<그림 1> 한국석탑의 일반적인 구조형식

에는 필요한 곳마다 철물로 보강하고 있다.

2. 석재의 재료특성

조적식 석탑의 실용적인 해석 모델링을 구현하기 위해서는 석재의 물리적 특성을 가능한 정확하게 파악하는 것이 중요하므로 기존에 미리 조사되어 있는 미륵사지 석탑에 대한 암석의 특성과 채석산지를 조사연구한 보고서2)를 검토하여, <표 1> 및 <표 2>와 같은 재료 및 절리면의 특성값을 설정하였다.

<표 1> 석재의 블록성질

재료 특성	밀도 (g/cm ³)	압축 강도 (MPa)	인장 강도 (MPa)	탄성 계수 (GPa)	포와 송비	체적 계수 (MPa)	전단 계수 (MPa)	점착력 (MPa)	내부 마찰 각 (°)	삼축 압축 시험 (MPa)	
										구속 압력	강도
평균	2.65	198	12	33.4	0.20	18555	13916	27	57.4	7	278

<표 2> 석재의 절리면성질

재료 특성	면적 (cm ²)	길이 (cm)	JRC value	JCS (MPa)	점착력 (MPa)	마찰각 (°)	수직강성 (K _N) (GPa)	전단강성 (K _S) (GPa)
평균	42.3	6.7	4.8	56	0.03	28.3	4.96	5.91

이 값은 조적식 석탑의 구조해석을 위해 사용되는 개별요소해석 프로그램인 3DEC에서 요구되는 <표 3>과 같은 입력데이터로 적용된다.

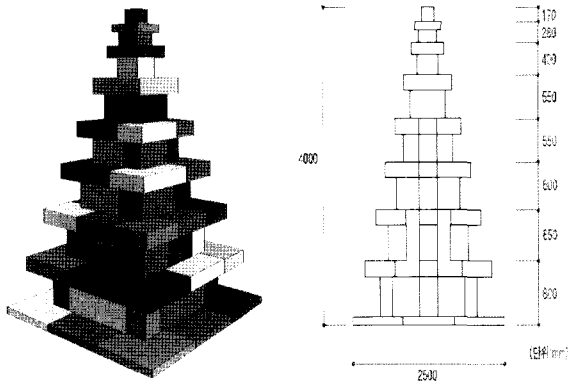
<표 3> 3DEC프로그램에서 요구되는 재료성질

분 류	블록 성질	절리면 성질
필요한 재료 성질	단위부피당 질량, 탄성계수(E), 포와송비(v), 마찰각(φ), 점착력(c), 팽창각(ψ)	절리면 마찰각, 절리면 점착력, 팽창각, 인장강도, 절리면 수직강도, 절리면 전단강도

3. 구조 모델링 방안

3.1 석탑모델의 기하학적 형상

한국의 석탑은 평면적으로 볼 때 방형탑이 거의 대부분을 차지하고 있고, 석탑의 층수는 3층인 경우



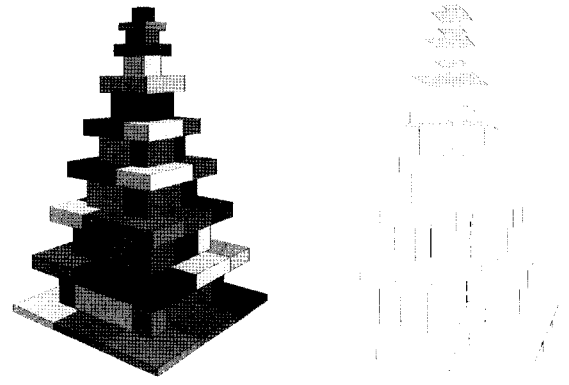
〈그림 2〉 석탑모델

가 많으며, 기단부, 탑신부, 상륜부 등 3부분으로 거의 구성되어 있다. 따라서, 우리나라에 존재하는 조적식 석탑의 가장 일반적인 구조형식인 기단부, 탑신부, 상륜부 등 3부분으로 구성되어 있는 높이 4m, 가로, 세로 2.5m의 기단을 가진 단순화한 3층의 방형탑을 기본석탑 모델로 선정하고 <그림 2>와 같이 모델링하였다.

3.2 조적식석탑의 구조모델링

일반적인 조적식 석탑의 구조해석을 수행하기 위해서는 먼저 석탑의 기하학적 형상 및 구성요소들의 역학적 특성이 파악되어야 한다.

조적식 석탑은 근본적으로 불연속체로서 연속체와 다른 역학적 거동을 나타내기 때문에 불연속체로서 다루어져야 한다. 또한 석탑의 붕괴거동을 파악하기 위해서는 외력이나 구성요소의 내구성 저하에 따라 발생하는 구성요소의 위치이동에 대한 영향이 파악되어야 한다. 석재의 이동에 따른 영향을 고려하기 위해서는 석재와 석재사이의 불연속면에 대한 모델링이 가능하여야 하며, 불연속면에서의 큰 변위나 회전을 고려할 수 있어야 한다. 또한 석재의 이동에 따른 불연속면의 새로운 접촉도 반영할 수 있어야 한다. 일반적으로 구조해석에 많이 사용되는 유한요소법은 이러한 요구성능을 만족시키기에는 한계가 있다. 반면에 개별요소법은 석재 사이의 미끄러짐, 석재사이의 큰 변위 및 회전, 균열에 의한 벌어짐, 석재의 완전한 분리, 새로운 접촉면의 탐색이 가능하기 때문에 석탑의 붕괴거동을 파악하기에 적합하다.



(a) 블록구성모델

(b) 절리면구성모델

〈그림 3〉 조적식석탑의 불연속모델

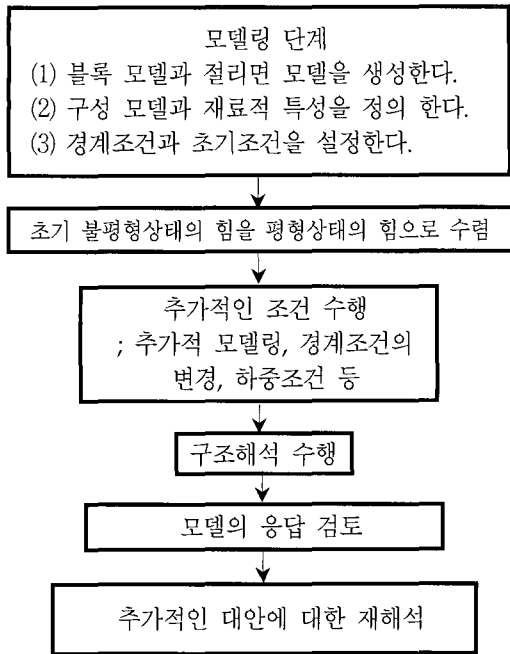
개별요소법에서는 <그림 3>과 같이 크게 블록 구성 모델과 절리면 구성 모델로 나뉘어 지고 이 구성 모델을 기본으로 모델링해석을 수행하게 된다.

개별요소법을 이용한 해석을 수행하기 위해서는 대상구조물인 조적식 석탑에 대한 양질의 수치적 구조해석 모델링을 하여야 한다. 본 연구에서는 지진하중에 대한 구조해석의 경우를 제외하고 조적식 석탑의 각 석재에 발생하는 응력을 측정하기 위해 변형할 수 있는 탄성블록구성모델을 사용하였으며, 불연속면을 이루고 있는 절리면은 석탑의 경우 블록들이 각각의 면을 경계로 접해있고, 절리면은 전단 또는 인장파괴시 감소된 절리면의 내부 마찰각, 점착력 등을 반영할 수 있어야 하므로, 이를 반영할 수 있는 면접촉 모어-쿨롱 모델을 이용하여 모델링하였다.

3.3 조적식석탑의 구조모델링 및 해석과정

개별요소법을 이용한 조적식 석탑의 실용적인 해석 모델링을 구현하기 위해서는 대상 구조물인 조적식 석탑에 대한 양질의 수치적 구조해석 모델이 작성되어야 하며, 특히 대상구조물을 기본으로 하여 만들어진 개별요소모델과, 재료물성, 경계조건에 대한 기본적인 구성이 잘 갖춰져야 한다.

개별요소법을 이용한 구조해석 과정은 <그림 4>와 같다. 먼저 초기조건에 따라 블록 구성모델과 절리면 구성모델을 이용하여 모델링을 수행하고, 구성 모델, 재료적 특성, 경계조건, 초기조건 등을 설정한



<그림 4> 구조모델링 및 해석과정

후, 불균형 상태의 힘을 평형상태에 수렴시키고, 추가적인 조건들을 적용하여 구조해석을 수행한다. 또한 구해진 모델응답을 검토하고, 추가 대안에 대한 재해석을 수행한다.

4. 조적식 석탑의 구조해석

4.1 지진하중에 따른 구조해석

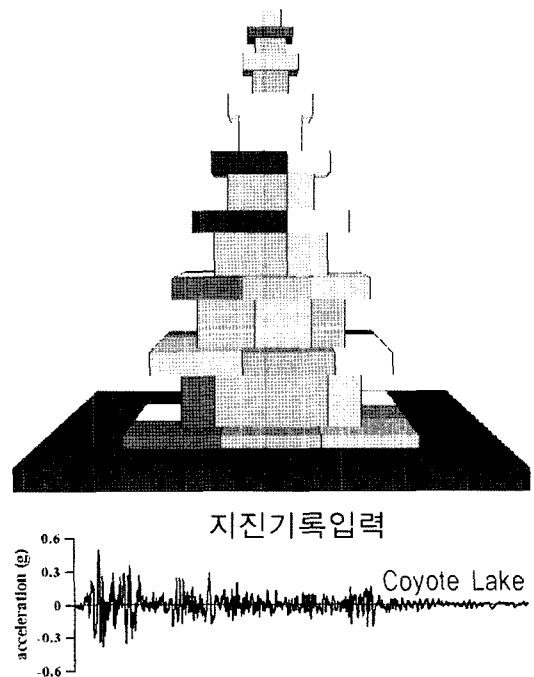
동적하중에 대한 구조물의 거동 해석에는 지진하중을 등가의 정적수평하중으로 산정하여 계산하는 등가정적해석법(Equivalent Static Load Analysis)과 동적해석법(Dynamic Analysis)이 있다. 등가정적해석법은 건축물이 고층이거나 비정형 구조일 때는 사용하기 어려우며 또한, 중요도가 높은 건물이나 동적특성이 특이한 구조물, 정밀해석이 필요한 경우에는 사용할 수 없다. 이러한 경우에는 정적해석시 고려하는 구조변위에 따른 구조계의 탄성복원력만이 아니고 운동하는 구조계가 가지는 동적특성인 관성력과 시간의 경과에 따른 운동에너지의 손실효과를 고려하여 구조물의 응답을 구하는 동적해석법을 사용해야 하는데, 동적해석법은 입력하중의 형태에 따라 응답스펙트럼해석법과 실제 지진기록을 이용한 시간이력해석법으로 구분할 수 있다. 본

연구에서는 지진의 발생으로 인해 조적식구조물이 비탄성적 거동을 보일 경우, 단순한 응답스펙트럼해석법만으로는 구조물의 응답특성을 정확히 규명하기가 곤란하므로 구조물의 붕괴절차를 명확하게 시뮬레이션 하기 위해 시간이력해석을 수행하였다. 특히 지진하중에 대한 해석 시에는 실제 지진에 의해서 발생되는 변형과 붕괴가 블록 자체의 파괴가 아닌 블록과 블록사이의 구속력이 매우 작은 절리면의 거동에 의해 결정되므로 강체블록으로 모델링하였으며, 이 경우 변형할 수 있는 블록구성모델의 선택시 발생하게 되는 긴 해석시간 또한 단축시킬 수 있었다. 조적식석탑에는 먼저 자중이 가해지고, 그 다음 <표 4>와 같이 조적식석탑의 지진해석을 위해 선택된 규모 5.8의 Coyote Lake의 지진기록을 <그림 5>와 같이 미리 모델링된 기초판에 수평방향으로 입력하였다.

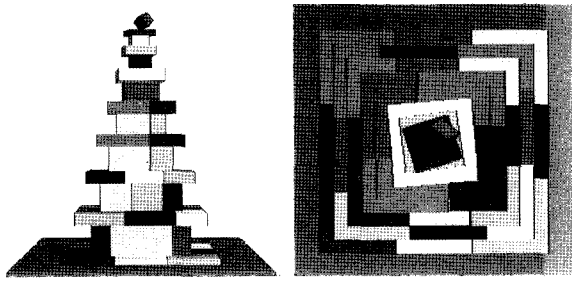
<그림 6>은 조적식석탑에 지진 발생시 석탑의 붕

<표 4> 지진하중

Event Name	M	Comp.	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)
Coyote Lake	5.8	230	-408.7	43.53



<그림 5> 지진하중을 고려한 조적식석탑 해석모델



<그림 6> 지진하중에 의한 조적식석탑모델의 붕괴형상

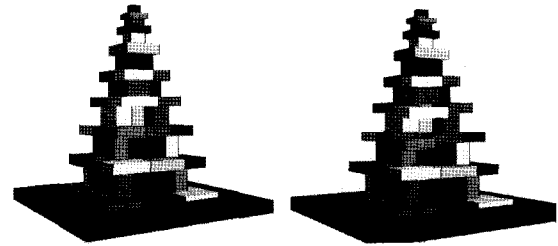
괴형상을 보여준다. 지진발생시 석탑상층부위의 블록들이 붕괴되기 시작하는 것을 볼 수 있으며, 각 블록들의 결구부가 풀려 부재들이 전체적으로 흐트러져 있는 모습을 볼 수 있다.

4.2 석재의 내구성저하에 따른 구조해석

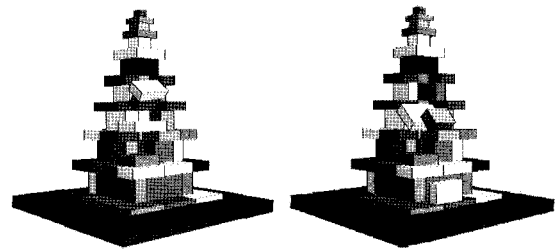
석재의 내구성을 저하시키는 요인으로는 물리적 작용, 화학적 작용, 생물학적 작용 등이 있다. 특히 생물학적 작용에 의한 내구성 저하는 결과적으로 물리적 또는 화학적 내구성 저하를 촉진시키는 원인이 된다. 자연계에 있어서는 대개 물리적 작용에 의한 내구성저하와 화학적 작용에 의한 내구성저하는 동시에 일어난다.

이와 같이 석재의 내구성을 저해하는 3가지 원인으로 인해 석탑을 구성하는 일부 석재가 내구성이 저하 되어, 국부적인 결함이 발생하게 되면 전체구조물에 영향을 미치게 되어 전체구조물의 안전성을 잃게 될 수 있다. 따라서 구조물의 주요부재가 내구성을 잃게 되어 구조재료의 역할을 하지 못한다고 가정하여 내구성을 잃게 된 부재를 탈락시켜 구조해석을 수행하였다.

기본석탑모델의 탑신부 부위의 블록들의 내구성이 저하되었다고 가정하여 탑신부 부위의 임의의 블록들을 제거한 후 구조해석을 수행한 결과 중 <그림 7>은 각 시간단계별 붕괴형상을 <그림 8>은 <그림 7(c)>의 붕괴상태에서의 응력분포를 보여준다. 임의의 블록들을 제거한 후에 하중을 가하여 시간에 따른 해석을 계속 수행하며 발생된 붕괴형상 및 응력분포를 나타낸 <그림 7>은 제거된 탑신부 부위의 상부에 위치한 부재들이 부분적으로 안정성을 잃게 되어 붕괴가 계속 진행되게 되고, 붕괴가

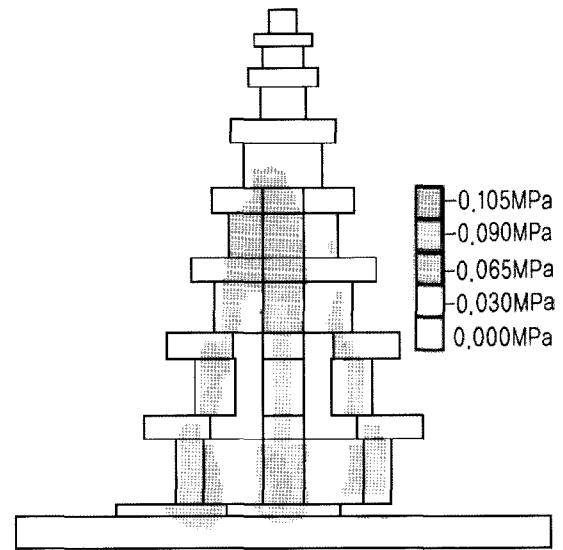


(a) 주요구성부재의 탈락 (b) 해석진행 1



(c) 해석진행 2 (d) 해석진행 3

<그림 7> 석재의 내구성저하에 따른 조적식석탑의 붕괴형상



<그림 8> 석재의 내구성저하에 따른 조적식석탑의 응력분포형상

일어난 부재가 다시 그 하단의 부재에 충격하중을 발생시켜, 결국 시간이 흐른 후 구조물의 전체적인 붕괴를 일으키는 모습을 보여주고 있다. 또한 붕괴가 일어나는 과정동안의 석탑 전체에 걸쳐 분포하는 응력들을 분석한 <그림 8>을 살펴보면, 제거된 블록들이 지지하고 있던 하중을 제거되지 않은 블록들이 하중을 지지하게 되어 응력재분배가 일어나게 되고, 이에 따라 부재가 제거된 방향으로 응력분

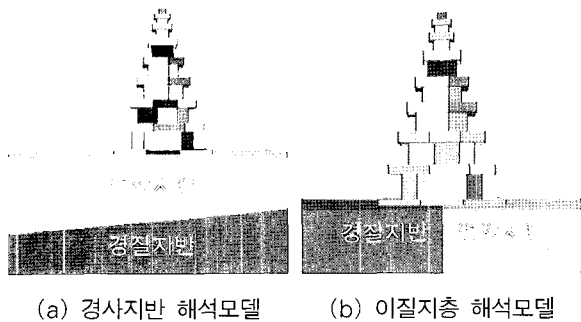
포가 증가되는 현상을 볼 수 있다. 또한 붕괴가 진행될수록, 블록에 발생된 최대값이 점차 커지고 있는 경향을 볼 수 있으며, 특히 기단부 부분의 심주석의 응력이 붕괴가 일어난 방향으로 이동하는 경향을 볼 수 있다.

4.3 지반침하에 따른 구조해석

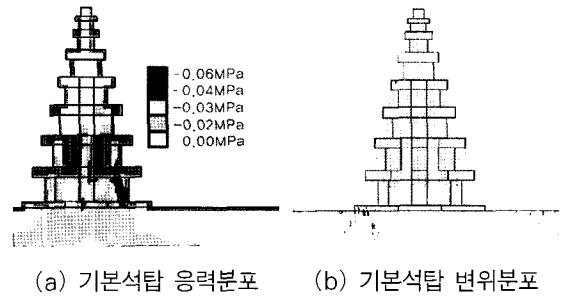
지반은 연약층의 깊이차, 경사면, 지하유수방향 등에 의해 부등침하가 생기게 되며 이러한 원인에 의해 조적식 석탑에 균열을 유발시킨다. 지반의 허용 침하량 이상의 하중이 작용하거나 장기간에 걸쳐 지반이 서서히 가라앉게 되는 부등침하의 영향은 여러 가지가 있다. 부등침하가 발생하게 되면 구조물에서 침하가 일어나는 부위와 반대로 부상하는 부위에 의하여 비틀림 현상이 일어나게 되며 이는 구조물에 응력요소로 작용하게 되어 대각선 인장균열이 차등적인 침하에 따라서 발생하게 되고 경압반 같은 침하되지 않는 부위는 대체로 중심부위에서 발생하게 된다.

따라서 이와 같은 부등침하 현상에 의한 지반 상부의 조적식 석탑의 거동을 분석하기 위해 연약지반과 암반층을 형성하고 있는 경사지반 해석모델과 이질지층 해석모델을 <그림 9>와 같이 모델링하고, 지반상부는 조적식 석탑모델을 사용하였다.

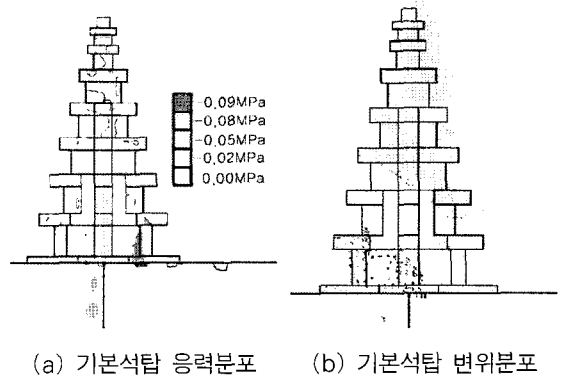
<그림 10>과 <그림 11>은 연약지반과 경질지반의 경계면이 이루는 경사도가 5°인 경우의 해석모델과 경사도가 90°(이질지층)인 경우의 해석모델에 대한 해석결과를 보여준다. 해석결과를 살펴보면 5°의 경사지반을 가진 경우와 이질지층인 경우 전체적인 응력분포가 경사방향 쪽 우측 하단부의 기단부의 석재에 응력이 집중하는 것을 볼 수 있으며,



<그림 9> 지반특성에 따른 해석 모델



<그림 10> 지반특성(경사도 5°)에 따른 분석결과



<그림 11> 지반특성(이질지층)에 따른 분석결과

변위 또한 경사지반쪽으로 침하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만 5°의 경사지반을 가진 경우에 비해 이질지층인 경우 보다 큰 최대압축응력과 변위가 발생한 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 연약지반과 경질지반의 경계면이 이루는 경사도가 커질수록 석탑에 균형을 이루며 분포하던 응력이 석탑의 부등침하로 인해 더 큰 불균등한 응력분포로 변해가면서 전체 석탑의 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 기존의 석탑형식을 단순화한 일반적인 조적식 석탑의 구조모델링 및 해석기법을 제시하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 조적식 석탑의 각 석재에 발생하는 응력을 측정하기 위해 지진하중에 대한 구조해석의 경우를 제외하고 변형할 수 있는 탄성블록구성모델을 사용하였으며, 불연속면을 이루고 있는 절리면은 석탑의 경우 블록들이 각각의

면을 경계로 접해있고, 절리면은 전단 또는 인장파괴시 감소된 절리면의 내부 마찰각, 점착력 등을 반영할 수 있어야 하므로, 이를 반영할 수 있는 면접촉 모어-쿨롱 모델을 이용하여 모델링 하였다.

- 2) 지진하중에 대한 해석 시에는 실제 지진에 의해 석탑에 발생하는 변형과 붕괴가 블록 자체의 파괴가 아닌 블록과 블록사이의 구속력이 매우 작은 절리면의 거동에 의해 결정되므로 강체블록으로 모델링하였으며, 이 경우 변형할 수 있는 블록구성모델의 선택시 발생하게 되는 긴 해석시간 또한 단축시킬 수 있었다.
- 3) 지진 발생시 석탑상층부위의 블록들이 붕괴되기 시작하는 것을 볼 수 있으며, 각 블록들의 절구부가 풀려 부재들이 전체적으로 흐트러져 있는 모습들을 볼 수 있었다.
- 4) 경질지반층과 연약지반층의 경사도가 클수록 연약지반층에 놓여있는 석탑의 기단부 하단에 지반의 경사방향으로 변위가 발생하여 부등침하 현상이 발생하게 되고 시간이 흐름에 따라 석탑전반에 걸쳐 안정성을 잃게 되어 결국 석탑에 큰 위험을 초래할 것으로 판단된다.
- 5) 조적식 석탑의 구조해석시 석재사이의 미끄러짐, 석재사이의 큰 변위 및 회전, 균열에 의한 벌어짐, 석재의 완전한 분리 등 불연속면의 역학적 거동을 표현하는 것은 매우 중요하며 이러한 불연속면의 역학적특징을 가장 잘 표현할 수 있는 개별요소법을 조적식 석탑의 해석기법으로 제안하였다.

참고문헌

1. "3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide", Itasca Consulting Group, Inc., 2003
2. "익산 미륵사지 석탑 구조안전진단", 전라북도, 한국건설안전기술원, 1998
3. "미륵사지석탑 해체조사보고서 I", 국립문화재연구원, 2003
4. "미륵사지석탑 해체조사보고서 II", 국립문화재연구원, 2004
5. "미륵사지 유구조사 및 가설공사 지반조사보고서", (주)지우 엔지니어링, 1999
6. "익산사지동탑 복원설계보고서", 문화재관리국, 1990
7. 김부식, "삼국사기", 고려 인종, 1145년
8. 강후진, "와유록(臥遊錄)", 18세기
9. "조선지진연구소 조선지진목록", 1984
10. 대한건축학회, "내진설계기준연구 II", 건설부, 1997
11. 대한건축학회, "건축구조설계기준", 기문당, 2005
12. 이현호, 한상환, 이리형, "지진위험도를 고려한 설계지진기록 선정," 대한건축학회논문집, 제6권, 제5호, pp.37-41, 2000
13. Alberto Drei, Carlos Sousa Oliveira, "The seismic behaviour of the "Aqueduto da Amoreira" in Elvas using distinct element modelling", Historical Constructions, pp.903-912