

미륵사지 석탑의 축조형식에 따른 구조성능 평가

Structural Performance Evaluation of Stone Pagoda of Mireuk Temple Site in accordance with Construction Type

김 호 수*
Kim, Ho-Soo

박 찬 홍**
Park, Chan-Hong

이 하 나***
Lee, Ha-Na

Abstract

The stone pagoda of Mireuk temple site is currently restoring through the repairing process. This stone pagoda has the various construction types in the inner and outer space. Therefore, the stress concentration and structural behavior need to be considered through the analysis of various construction patterns. To this end, this study presents the structural modelling and analysis considering the discrete element analysis technique to solve the discontinuum behavior between the stone elements. Also, this study performs the structural performance evaluation through the various design variables for the safety of stone pagoda. Through the analysis results, we can find out the small stress concentration in the several members. But, because the stresses and displacements are relatively small, we can secure the safety of the whole structure.

Keywords : Stone Pagoda of Mireuk Temple Site, Construction Type, Structural Modelling, Structural Performance Evaluation

1. 서 론

우리나라 최고, 최대의 석탑으로 그동안 절반 이상이 붕괴되어 6층 일부까지만 남아있는 미륵사지 석탑은 현재는 해체후 보수정비 절차를 통해 복원 중에 있다. 이러한 미륵사지 석탑의 기본적인 축조 형식을 살펴보면, 1층 내부에 동서남북 네 방향으로 십자형 공간이 존재하며 그 중심에 심주석이 형성 되어 있는 것이 특징이다. 또한, 기단부에는 개구부가 형성되어 있으며, 외부 치장석의 경우 뒷뿌리를 두어 내부 적심과 맞물려 있는 형태를 나타내고 있어 보수정비를 통한 복원시 이에 대한 응력집중 현상 파악 및 석탑의 전체적인 거동분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 미륵사지 석탑의 축조 및

구조형식을 분석하여 각 부분별 구조모형화 방안을 강구한다. 특히 미륵사지 석탑의 경우 조적식 구조물로서 석재사이의 불연속면의 역학적 특성을 반영할 수 있는 개별요소해석기법을 적용하고자 한다. 또한 해석결과를 바탕으로 미륵사지 석탑의 복원시 안전성확보를 위해 석재의 강도 및 인장파괴, 미끄러짐 등에 대한 구조안전성능을 평가하고자 한다.

2. 미륵사지 석탑의 축조형식 분석

2.1 미륵사지 석탑의 축조형식

미륵사지 석탑은 1층의 경우 십자형 통로가 있어 네 방향의 개구부가 있으며, 외부 치장석과 내부 면석사이에 적심석이 채워져 상부를 지지하는 구조를 가지고 있다. 2층의 경우 외부치장석이 사면으로 둘러싸고 적심석이 내부를 공극 없이 채워 축조된 형태로 상부의 하중을 받아 1층 십자통로로 인해 발생하는 4개의 지지부에 전달하는 역할을 한다. 또한, 북동 측으로 부재가 집중되어 비대칭으로 복원되는 3층부터는 외부 치장석이 동측과 북측에만 존

* 교신저자, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Eng., Cheongju University
Tel:043-229-8483, Fax:043-229-8483
E-mail : hskim@cju.ac.kr

** 청주대학교 건축공학과 박사과정
Dept. of Architectural Eng., Cheongju University

*** 청주대학교 건축공학과 석사과정
Dept. of Architectural Eng., Cheongju University

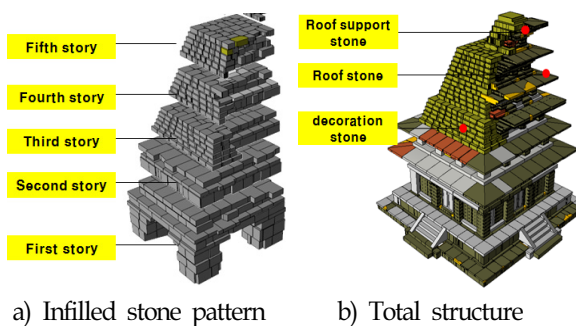
재하며 서측과 남측은 자연석이 외부를 형성하여 내부적심석을 둘러쌓아 층을 구성한다. 6층의 경우 북동 측에 일부분 외부 치장석이 구성되어있다.¹⁾

2.2 층별 내부적심 모형 분석

미륵사지 석탑은 비교적 부피가 큰 석재로 구성된 내부적심이 각 층마다 위치하여 전체 석탑에서 큰 비중을 차지한다. <Fig. 1> 및 <Table 1>과 같이 1층의 경우 십자통로의 벽면을 구성하는 면석과 외부 치장석으로 둘러싸인 4개의 위치에 적심석이 3개 층으로 축조되어 석탑의 기둥 역할을 함으로써 구조물을 지탱하고 상부하중을 받아 하부 기단부로 전달한다. 1층 개구부 위로는 4개의 위치로 구분되는 적심석이 하나로 합쳐져 5층까지 층별 단일화된 적심석이 채워지는데, 4개의 적심으로 나누어지는 십자통로 적심석과 1층 개구부 위 적심석부터 1층 옥개석 층의 적심석까지 1층 적심으로 구분한다.

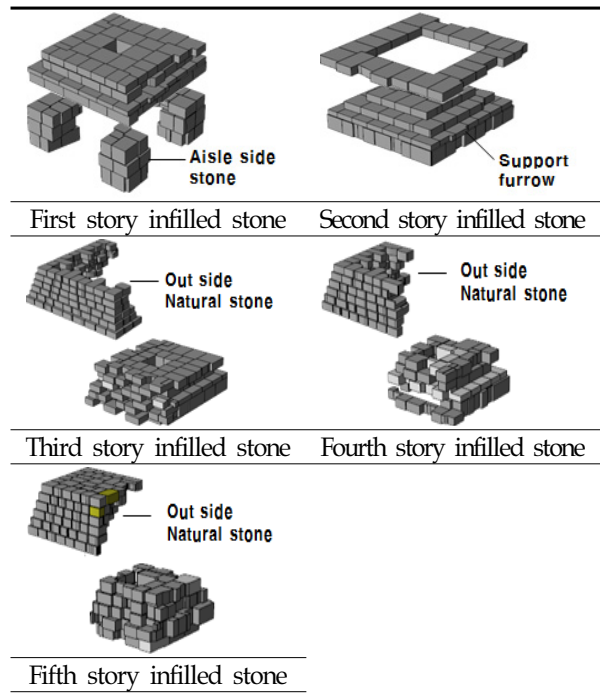
또한, 2층부터 5층까지 층별 적심의 구분은 탑신 받침석부터 옥개석 층의 적심석까지 그 층의 적심으로 구분하였으며, 각 층마다 2~4개 층으로 수직 및 수평줄눈이 생기지 않도록 적심석을 축조하였다.

1층과 2층은 비교적 기존부재가 많이 남아있어 좌우 대칭이 되도록 외부 치장석을 축조할 수 있는데, 그 이상 층에서는 해체 전 콘크리트로 보수한 위치이기 때문에 기존부재가 남아있지 않아 내부적심석이 노출된다. 이에 따라 3층부터는 서측과 남측에 석탑 전체의 외형과 어색하지 않도록 자연석으로 마감하여 내부적심을 감싸는 동시에 외부 치장석의 역할을 하며, 우기시 빗물이 내부로 스며들지 않도록 구성되어 있다.



<Fig. 1> Construction type

<Table 1> Infilled stone modelling



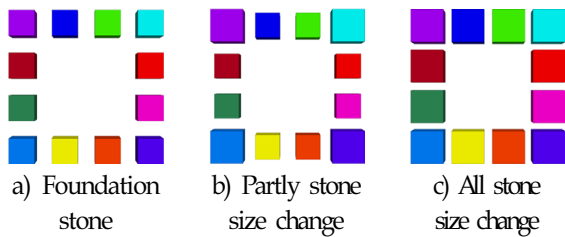
3. 구조모형화 및 해석방안

3.1 구조모형화 방안

개별요소해석기법에 의한 구조해석 모델을 적용하기 위해서는 부재 정형화 작업이 필요하다. 개별요소해석 프로그램에서는 다듬어지지 않은 석재에서 나타나는 오목형상과 곡선형상의 표현이 불가능하기 때문에 구조부재 형상이 변하지 않는 범위 내에서 오목형상과 곡선형상을 블록형상과 직선형상으로 대체하여 표현해야 한다. 따라서 본 연구에서는 모델에서 발생하는 오목형상과 곡선형상에 대하여 구조부재의 전체적인 형상이 변화되지 않는 범위 내에서 블록형상과 직선형상으로 대체하여 표현하였으며, 개별부재 각각에 대한 정형화 작업을 수행하여 미륵사지 석탑모델을 구조모형화 하였다.

1) 초반석 구조모형화 방안

초반석의 크기 및 위치에 따른 응력분포변화를 검토하기 위해 가로, 세로 1.5m의 초반석을 2.0m로 증가시켜보았으며, 모서리 초반석 및 모든 초반석의 크기를 증대시킨 모델을 서로 비교한 형태는 <Fig. 2>와 같다.

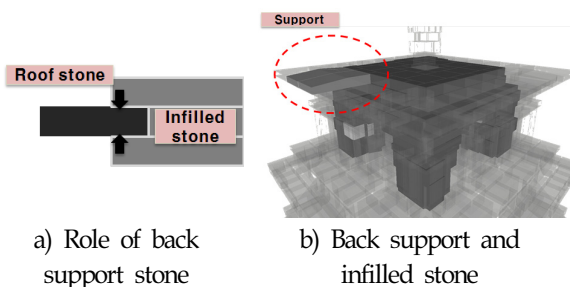


〈Fig. 2〉 Foundation stone modelling

2) 뒷뿌리 구조모형화 방안

미륵사지 석탑은 외부 치장석이 내부 적심석을 둘러 싸고 있는 구조를 갖추고 있는데, 외부 치장석과 내부 적심석사이의 수직 줄눈발생으로 인한 외부 치장석의 미끄러짐이 발생할 가능성이 있다. 이에 대한 방안으로 뒷뿌리를 구성하여 외부치장석과 내부적심석을 연계하고자 한다. <Fig. 3>과 같이 한 개 층의 적심석이 상부와 하부 적심석보다 수평방향의 크기를 작게 만들어 상·하 적심석보다 작아 생기는 공간을 외부 치장석이 들어와 내부 적심의 수직하중에 의해 외부 치장석과의 하중전달 매커니즘을 공유함으로써 미끄러짐을 방지한다.

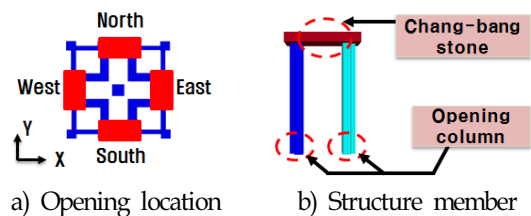
미륵사지 석탑의 경우 옥개석, 상옥개받침석 및 하옥개받침석이 뒷뿌리 역할을 하도록 하였으며, 1층부터 6층까지 층별 옥개석 및 옥개받침석을 뒷뿌리 구조로 설정하여 외부 치장석과 내부적심석이 상호 연계되도록 하였다. 1층과 2층의 경우 외부치장석이 대칭으로 축조되어 뒷뿌리가 4면에 위치하며 비대칭으로 축조된 3층부터 옥개석과 옥개받침석이 있는 동북쪽에 뒷뿌리가 위치하도록 구조모형화를 수행하였다.



〈Fig. 3〉 Support stone modelling

3) 개구부 구조모형화 방안

미륵사지 석탑의 개구부는 <Fig. 4>와 같이 1층의 십자형 통로로 인해 동서남북 네 방향에 4개의 개구부가 존재한다. 개구부는 좌우 기둥과 두 기둥을 이어주는 상부의 창방석으로 구성되어 있는데, 상부 창방석이 수직하중에 의해 중심부 처짐이 발생함과 동시에 좌우 기둥에 의한 솟음현상이 나타나 균열 등의 훼손이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 개구부를 미륵사지 석탑의 취약 부위로 선정하고 네 방향 개구부에 대한 거동을 분석하였다.



〈Fig. 4〉 Opening modelling

3.2 재료특성 모델

미륵사지 석탑의 구조해석을 수행하는데 필요한 석재의 재료특성과 접촉면 특성을 적용하기 위하여 '구조해석을 통한 미륵사지석탑 붕괴원인 조사연구 보고서²⁾를 참조하였으며, 적용된 석재의 재료특성 및 접촉면 특성 값은 <Table 2> 및 <Table 3>과 같다. 또한 신재의 경우 재료특성 실험을 통한 물성치 값이 없기 때문에 압축강도 추정에 따른 석재 재료특성과 거칠기 등급에 따른 접촉면특성을 적용하여 해석을 수행하였다.

〈Table 2〉 Material properties

Sample No.	평균	
Density (g/cm ³)	2.65	
Compressive strength (MPa)	198	
Tensile strength (MPa)	12.0	
Elastic modulus (GPa)	33.4	
Poisson's ratio	0.20	
Bulk modulus (GPa)	18.56	
Modulus of rigidity (GPa)	13.92	
Viscosity (MPa)	27.0	
Frictional angle (°)	57.4	
Triaxial compression test (MPa)	Confine stress	7.00
	Strength	278

<Table 3> Contact characteristics

Sample No.	평균
Area (cm ²)	42.3
Length (cm)	6.70
Roughness (JRC)	4.8
Compressive strength (JCS) (MPa)	56.0
Viscosity (MPa)	0.03
Frictional angle (°)	28.3
Vertical stiffness (K _v) (GPa)	4.96
Shear stiffness (K _s) (GPa)	5.91

3.3 해석기법 분석

본 연구에서는 미륵사지 석탑의 구조해석을 위해 개별요소해석기법을 적용할 수 있는 3DEC 프로그램³⁾을 사용하였다. 3DEC 프로그램은 불연속체 구조물해석에 많이 사용하는 프로그램으로 미륵사지 석탑과 같이 구조부재사이의 완전 접촉 없이 조적조형대로 축조된 구조물의 거동분석에 활용이 용이하며, 개별 부재사이의 불연속적인 매커니즘표현, 석재사이의 미끄러짐, 큰 변위 및 회전의 반영이 가능하기 때문에 해석결과의 신뢰성이 높을 것으로 판단된다.⁴⁾⁵⁾ 또한, 하중의 경우 외부의 하중작용 없이 자중만을 고려하여 구조해석을 수행하였다.

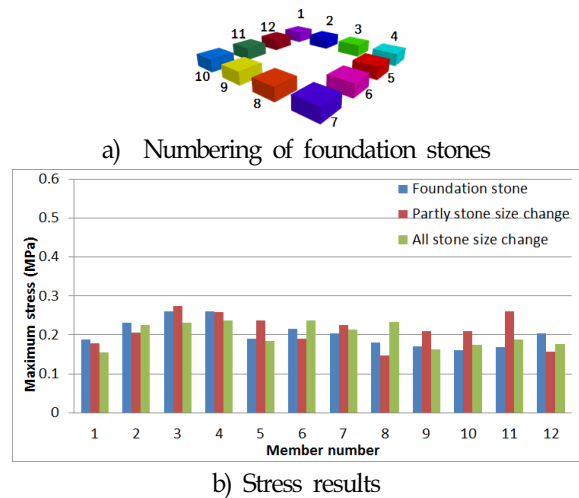
4 주요부분 축조형식을 고려한 구조거동 분석

4.1 초반석 크기 및 위치

분석결과 <Fig. 5>와 같은 세 가지 모델에서 모두 허용지내력의 최소값인 0.467MPa를 넘지 않는 응력의 크기가 나타났으며 초반석의 크기를 증대시킨 경우 최대응력의 위치가 변화하였다. <Table 4>와 같이 기존 초반석모델의 경우 6층까지 축조된 북동측 초반석인 3번과 4번 초반석에서 최대응력의 크기가 나타났으며 모서리 초반석을 증대시킨 경우 3번과 4번 초반석에서 기존 초반석과 유사한 크기가 나타났지만 9번, 10번, 11번 초반석에서 기존 초반석 모델보다 응력의 크기가 증가하였다. 이러한 원인은 모서리 초반석의 면적증가로 인해 상부부재를 지지하는 새로운 접촉면이 발생하여 힘의 흐름 변화에 따른 현상으로 판단된다.

또한 모든 초반석의 면적을 증가시킨 모델의 경

우 일부 부재를 제외한 초반석의 응력이 기존 초반석에 비해 감소하였으며, 10번, 11번 등 기존 초반석에서 비교적 작은 응력의 크기를 나타낸 일부 초반석에서 약간 증가하는 경향이 나타났다. 이는 동일 하중을 지지하는 초반석의 면적이 증가하여 응력집중현상이 감소한 것으로 판단되며, 일부 초반석에서 응력 증가는 상부부재를 지지하는 새로운 접촉면적이 생김으로 인해 면적 증가로 인한 응력 감소효과 보다 수직하중의 증가폭이 크기 때문에 응력증가 현상이 발생한 것으로 판단된다.



<Fig. 5> Stress results of foundation stones

<Table 4> Maximum and minimum stresses

Division	Foundation stone	Partly stone size change	All stone size change
Maximum stress	(No.3) 0.261 MPa	(No.3) 0.274 MPa	(No.6) 0.236 MPa
Minimum stress	(No.10) 0.160 MPa	(No.8) 0.147 MPa	(No.1) 0.154 MPa
Stress difference	0.101 MPa	0.127 MPa	0.082 MPa

4.2 내부적심과 연계한 뒷뿌리 역할

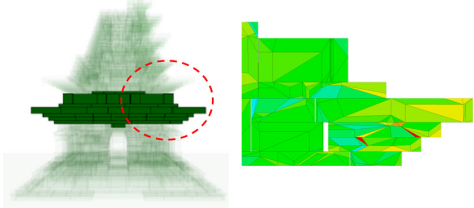
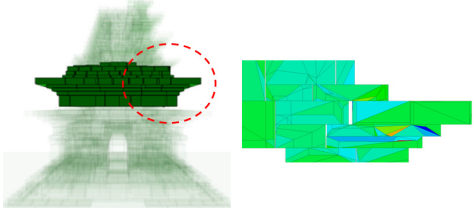
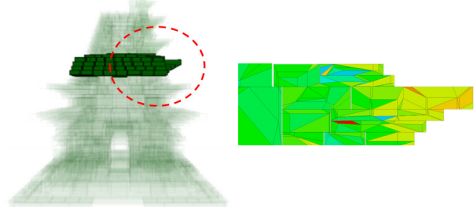
뒷뿌리는 외부 치장석과 내부적심이 결합되어 외부 치장석의 전도를 방지하기 위한 것으로 각층 옥개석 및 옥개받침석에 뒷뿌리를 두어 내부 적심과 연계하였는데, 이런 뒷뿌리와 내부적심이 연결되는 접촉부에서 뒷뿌리의 응력집중현상에 따른 균열 및 훼손이 우려된다. 이에 따라, 본 연구에서는 각 층

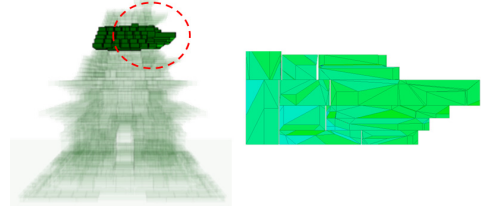
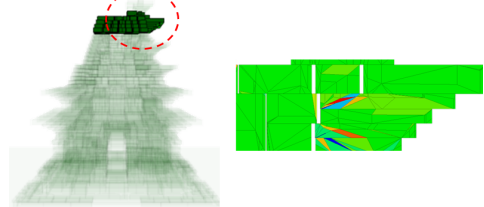
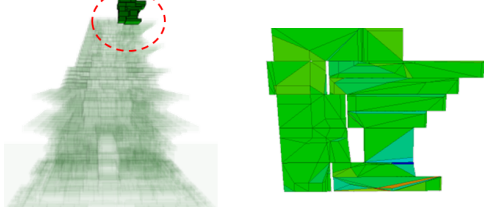
뒷뿌리의 거동을 분석하기 위해 <Table 5>와 같이 수직단면상의 층별 뒷뿌리의 응력집중현상을 분석하였다.

분석결과 일부 뒷뿌리 부재에 응력집중현상이 나타났으며, 층별 뒷뿌리 응력의 크기가 일정한 경향을 나타내지 않았다. 이는 층별 뒷뿌리에 작용하는 하중과 접촉면적이 다르기 때문에 응력의 크기가 다르게 나타난 것으로 판단된다. 또한 최대응력의 크기가 석재 압축강도에 비해 상당히 작기 때문에 뒷뿌리에 균열 및 훼손이 우려될 정도의 응력집중현상은 나타나지 않았다.

그렇지만 뒷뿌리 부재의 축조 및 시공단계에서 적심부분과 밀착되지 않고 이격이 발생할 경우 추가적인 응력집중현상이 야기될 수 있으므로 뒷뿌리 부재 시공시 신뢰도 확보 방안이 강구될 필요가 있다.

<Table 5> Back support stone behavior analysis

	Maximum stress	0.406 MPa
First story		
	Maximum stress	0.254 MPa
Second story		
	Maximum stress	0.588 MPa
Third story		

	Maximum stress	0.405 MPa
Fourth story		
	Maximum stress	0.472 MPa
Fifth story		
	Maximum stress	0.318 MPa
Sixth story		

4.3 개구부 주변

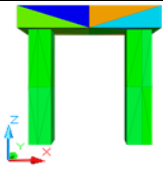
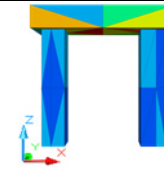
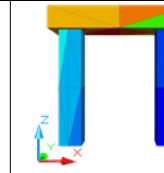
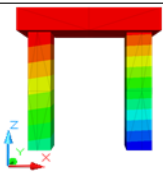
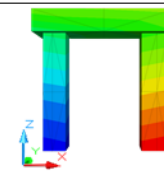
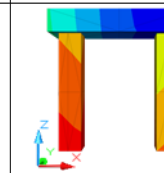
개구부의 경우 과도한 수직하중이 발생시 개구부 상부 창방석에 대한 훼손과 비대칭 복원으로 인한 미끄러짐 현상 등이 발생할 수 있는 부분에 대한 거동을 분석하였다. 응력분석결과 수평방향 응력의 경우 개구부 측면 부재가 연속되는 수평응력이 개구부 정면 십자통로와 일치하는 수평응력보다 크게 나타났으며, 일부 해석모델에서 좌우 기둥과 창방석이 접하는 위치에서 응력집중현상이 나타났다. 또한 수직응력의 경우 축조가 진행될수록 응력이 증가하는 경향이 나타났으며, 최대응력의 위치는 좌우기둥의 하부에서 발생하였다.

변위분석결과 <Table 6>과 같이 수직변위의 경우 수평변위보다 최대변위값이 크게 나타났으며, 최대변위의 위치가 창방석 중심에서 발생하였다. 수평변위의 경우 일부 해석모델에서 상부와 하부 부재의 방향이 서로 다른 변위가 발생하였으나 최대변위의 크기가 미세하기 때문에 미륵사지 석탑의 전체적인

거동에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

따라서, 개구부 거동분석결과 일부 응력집중현상 및 기울어짐이 나타났으나 최대응력 및 변위값이 상당히 작은 크기로 나타나 전체 석탑의 안전에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

<Table 6> Stress and displacement of opening

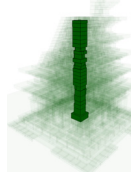

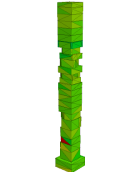
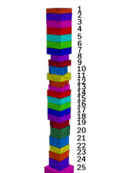
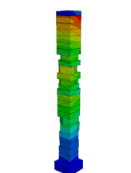
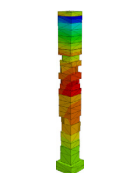
		
Maximum stress 0.091 MPa	Maximum stress 0.230 MPa	Maximum stress 0.836 MPa
a) X-axis stress	b) Y-axis stress	c) Z-axis stress
		
Maximum displacement 0.077 mm	Maximum displacement 0.063 mm	Maximum displacement 0.536 mm
d) X-axis displacement	e) Y-axis displacement	f) Z-axis displacement

4.4 심주석 역할

심주석은 석탑의 중심을 잡기 위한 구조부재로써 미륵사지 석탑 십자통로의 중심에 위치하며, 석탑 최하단부터 5층까지 수직으로 연속된 구조를 갖추고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 심주석의 구조적 역할을 파악하기 위해 먼저 <Table 7>과 같이 심주석의 응력 및 변위를 분석하였다.

검토결과 상부에서 하부로 갈수록 수직응력이 상승하였으며, 변위는 감소하는 경향이 나타났다. 최하단 부재의 경우 다른 부재보다 면적이 크고 흙, 잡석 채움 지반에 연계되어 있어서 수직응력이 상부 부재보다 감소한 것으로 판단된다. 또한 변위의 경우 면적이 작은 기존부재가 지지하는 상부 신부재의 모서리 부근에서 상대적으로 크게 발생하였으나, 응력 및 변위값 모두 크기가 미소하여 구조적 안전성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

<Table 7> Stress and displacement of center column stones

						
Member position	X-axis stress	Y-axis stress	Z-axis stress			
						
Member number	X-axis displacement	Y-axis displacement	Z-axis displacement			
No.	Stress (MPa)			Displacement (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.008	0.007	0.007	0.003	0.007	4.128
2	0.001	0.006	0.017	0.023	0.026	4.127
3	0.007	0.043	0.029	0.021	0.017	4.123
4	0.012	0.010	0.062	0.019	0.011	4.116
5	0.006	0.019	0.074	0.017	0.006	4.108
6	0.008	0.012	0.085	0.015	0.006	4.096
7	0.025	0.020	0.042	0.013	0.011	4.083
8	0.029	0.016	0.050	0.014	0.005	1.080
9	0.053	0.073	0.169	0.011	0.009	1.047
10	0.023	0.020	0.263	0.017	0.012	0.990
11	0.010	0.031	0.130	0.015	0.013	0.938
12	0.034	0.020	0.223	0.014	0.015	0.909
13	0.056	0.028	0.276	0.012	0.015	0.833
14	0.086	0.050	0.175	0.010	0.016	0.794
15	0.019	0.022	0.226	0.015	0.008	0.760
16	0.018	0.017	0.220	0.013	0.009	0.726
17	0.018	0.020	0.232	0.012	0.009	0.684
18	0.028	0.022	0.246	0.010	0.010	0.645
19	0.047	0.075	0.367	0.009	0.009	0.592
20	0.066	0.070	0.480	0.009	0.009	0.541
21	0.036	0.010	0.354	0.005	0.005	0.449
22	0.075	0.075	0.360	0.002	0.003	0.334
23	0.034	0.025	0.369	0.002	0.002	0.248
24	0.023	0.026	0.389	0.001	0.001	0.170
25	0.061	0.047	0.193	0.001	0.001	0.009

5. 구조성능 평가

5.1 압축응력 검토

본 연구에서는 부재별 구조 안전성을 평가하고자 하였으며, 응력 검토 방안으로 “미륵사지 석탑 구조 안정성평가 보고서”⁶⁾ 내의 암석시험결과 39~85MPa 중 최소값 39MPa에 대하여 허용압축강도식 (1)식을 적용하여 비교하였다.

$$\sigma < \sigma_a = 0.3f_{ck} = 11.7 \text{ MPa} \quad (1)$$

또한, (2)식과 같이 안전율을 5로 하여 암석시험 최소값 39MPa를 적용해 추가적으로 응력을 검토하였다.

$$\sigma_a = 7.8 \text{ MPa} \quad (\text{안전율 } n = 5) \quad (2)$$

대표적으로 <Table 8>과 같이 1층 기둥석의 응력 및 변위 분포 검토결과 모든 구조부재에서 수직응력에 대한 구조안전성이 확보되는 것으로 나타났다.

<Table 8> Stress and displacement of first story column stones

Member position	X-axis stress	Y-axis stress	Z-axis stress
Member number	X-axis displacement	Y-axis displacement	Z-axis displacement

No.	Stress (MPa)			Displacement (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.238	0.098	0.678	0.017	0.034	0.252
	OK	OK	OK			
2	0.048	0.042	0.830	0.002	0.014	0.302
	OK	OK	OK			
3	0.141	0.219	1.224	0.022	0.044	0.395
	OK	OK	OK			
4	0.107	0.101	0.926	0.039	0.037	0.311
	OK	OK	OK			
5	0.201	0.090	0.885	0.054	0.021	0.282
	OK	OK	OK			

6	0.143	0.248	1.012	0.072	0.029	0.333
	OK	OK	OK			
7	0.105	0.093	0.875	0.054	0.023	0.262
	OK	OK	OK			
8	0.249	1.037	1.032	0.048	0.036	0.294
	OK	OK	OK			
9	0.106	0.084	0.661	0.027	0.050	0.275
	OK	OK	OK			
10	0.039	0.146	0.703	0.013	0.030	0.213
	OK	OK	OK			
11	0.055	0.109	0.659	0.053	0.009	0.264
	OK	OK	OK			
12	0.246	0.332	0.810	0.025	0.032	0.336
	OK	OK	OK			

5.2 인장파괴 검토

미륵사지 석탑에서 균열 및 파괴 등의 훼손사례가 많이 나타나는 부재들을 주요구조부재로 선정하여 Griffith 기준을 적용한 인장파괴를 검토하였다.

(3)식을 만족할 때 타원 균열선단부분에서 인장균열의 전파가 발생하며, $\sigma_1 > \sigma_2$ 를 가정할 때 미소 균열 선단 부근에서 새로운 균열의 전파가 발생할 조건식은 (4), (5)식과 같다.⁷⁾

$$|\sigma| \geq \sqrt{\frac{2\xi E}{c\pi}} \quad (3)$$

$$\sigma_1 + 3\sigma_2 > 0 \text{ 일 때,} \quad (4)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_2) = 0$$

$$\sigma_1 + 3\sigma_2 < 0 \text{ 일 때, } \sigma_2 + \sigma_t = 0 \quad (5)$$

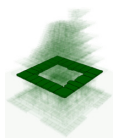
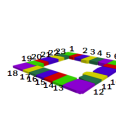
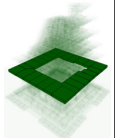
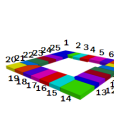
ξ = 균열면의 단위면적당 표면에너지

E = 암석의 영률 (Young's modulus)

σ_t = 암석의 인장강도

대표적으로 <Table 9>의 1층 상옥개받침석 및 옥개석의 인장파괴 검토결과 모든 부재에서 Griffith 기준을 통해 얻은 인장응력이 실험을 통해 얻은 재료의 인장강도보다 작은 값이 나타났다. 따라서 미륵사지 석탑 주요구조부재의 경우 인장에 의한 파괴는 안전한 것으로 판단된다.

<Table 9> First story roof support and roof stones

			
Member position	Member number	Member position	Member number
First story roof support stone		First story roof stone	

First story roof support stone				First story roof stone			
No.	Tensile strength	Tensile stress	Safety check	No.	Tensile strength	Tensile stress	Safety check
1	5.36	0.012	OK	1	5.36	0.078	OK
2		0.040	OK	2		0.052	OK
3		0.057	OK	3		0.059	OK
4		0.069	OK	4		0.062	OK
5		0.015	OK	5		0.046	OK
6		0.059	OK	6		-0.073	OK
7		0.023	OK	7		0.037	OK
8		0.069	OK	8		0.051	OK
9		0.047	OK	9		-0.085	OK
10		0.014	OK	10		0.062	OK
11		-0.418	OK	11		0.025	OK
12		0.035	OK	12		0.040	OK
13		0.058	OK	13		-0.103	OK
14		0.054	OK	14		0.043	OK
15		0.027	OK	15		0.044	OK
16		0.041	OK	16		0.067	OK
17		0.029	OK	17		0.077	OK
18		0.011	OK	18		0.038	OK
19		0.061	OK	19		0.062	OK
20		0.053	OK	20		0.024	OK
21		0.024	OK	21		0.049	OK
22		0.058	OK	22		0.016	OK
23		0.073	OK	23		0.015	OK
			24	0.026	OK		
			25	0.030	OK		

5.3 미끄러짐 검토

전단변위가 증가함에 따라 전단응력은 최대 강도에 도달할 때까지 계속 증가하며 정점전단응력 (Peak shear stress)에 도달하게 된다. 이후 전단변위가 계속 증가하면서 전단응력은 잔류전단강도 (Residual shear strength)로 떨어지며 큰 전단변위가 발생할 때까지도 일정한 값을 유지한다. 다양한 수직응력이 작용하는 경우 최대전단강도와 잔류전

단강도를 산정한 뒤 직선으로 근사화하여 나타낼 경우 전단강도 직선을 얻을 수 있다. 따라서 Mohr-Coulomb 조건에 따라 최대전단 강도(τ_p)와 수직응력(σ_n)의 관계를 식으로 표현하면 (6)식과 같다.

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \tag{6}$$

c = 불연속면의 점착강도

ϕ_p = 절리면의 마찰각

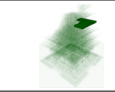
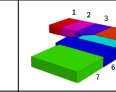
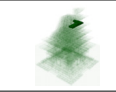
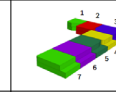
잔류전단강도가 유지되는 경우 점착강도 c 를 0으로 간주할 수 있으므로 τ_p 와 σ_n 의 관계는 (7)식과 같은 직선식으로 표현된다.⁸⁾

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \tag{7}$$

ϕ_r = 잔류 마찰각

<Table 10>은 Mohr-Coulomb 조건식을 적용하여 미끄러짐 검토 4층 옥개석 및 5층 탑신받침석에 대한 미끄러짐 검토를 수행한 결과 값이다. 미끄러짐 검토결과 모든 부재에서 수평응력보다 수직응력 및 마찰각의 상관관계식에서 얻은 값이 상대적으로 크게 나타나 미끄러짐에 안전한 것으로 판단된다.

<Table 10> Fourth story roof stone and fifth story body support stone

			
Member position	Member number	Member position	Member number
Fourth story roof stone		Fifth story body support stone	

Fourth story roof stone				Fifth story body support stone			
No.	Sliding check			No.	Sliding check		
	τ_p	$\sigma \tan \theta_p + c$			τ_p	$\sigma \tan \theta_p + c$	
1	0.012	0.053	OK	1	0.050	0.169	OK
2	0.040	0.089	OK	2	0.320	0.327	OK
3	0.064	0.094	OK	3	0.399	0.406	OK
4	0.094	0.155	OK	4	0.232	0.484	OK
5	0.068	0.070	OK	5	0.029	0.136	OK
6	0.074	0.103	OK	6	0.080	0.222	OK
7	0.028	0.071	OK	7	0.160	0.179	OK

6. 결 론

본 연구에서는 미륵사지 석탑의 축조형식에 따른 구조성능을 평가하고자 하였다. 이를 위해 미륵사지 석탑의 축조형식 및 내부 적심 형태에 대한 분석을 수행하였으며, 개별요소해석기법을 적용하여 구조 모형화 방안을 제시하였다. 또한 구조해석을 통한 미륵사지 석탑의 구조성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초반석 형태 및 크기에 따른 구조해석 결과 형태와 크기 모두 허용지내력을 넘지 않는 것으로 나타났다. 초반석의 크기를 증대시킨 경우 최대응력의 위치가 변화하였다. 이는 초반석의 면적이 증가하면서 상부부재를 지지하는 새로운 접촉면이 발생하여 힘의 흐름이 변화한 것으로 판단된다. 또한, 모든 초반석의 면적을 증가시킨 경우 대체적으로 응력이 감소하였다.

2) 뒷뿌리의 거동분석결과 옥개석과 옥개받침석에서 구성된 뒷뿌리가 내부적심석에 의해 약간의 응력집중현상이 발생하였다. 하지만 개구부와 뒷뿌리에 발생하는 변위 및 응력의 크기가 상당히 작은 값을 나타내기 때문에 석탑의 전체 거동에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

3) 개구부 주변의 응력검토 결과 좌우기둥과 창방석이 접촉하는 부분에서 응력집중현상이 나타났으며, 최대응력은 좌우 기둥의 하부에서 발생하였다. 또한, 변위의 경우 수직변위에서 최대변위 값이 크게 나타났고, 창방석 중심에서 최대변위가 발생하였다.

4) 심주석의 경우 응력 및 변위를 분석해본 결과 기존부재와 신부재가 접하는 위치에서 부재 크기가 달라 모서리 부근에서 상대적으로 큰 변위가 일부 부재에서 발생하였으며, 응력의 경우 수직으로 연속된 부재의 특성상 하부로 갈수록 상승하는 경향이 나타났다. 그러나 응력 및 변위의 크기가 미소하여 구조적 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

5) 구조성능 평가 결과 수직응력의 경우 모든 부재에서 재료의 허용압축강도를 만족하였으며, 인장 파괴 검토결과 주여구조부재 모두 인장파괴에 대하여 안전한 것으로 판단된다. 또한, 미끄러짐의 평가

결과 주요구조부재 모두 미끄러짐현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

6) 이에 따라 미륵사지 석탑의 주요구조부재에 대한 응력 및 변위 구조거동을 파악할 수 있었으며, 일부 부재에서 약간의 응력집중현상이 발생하였지만 응력 및 변위의 크기가 상대적으로 작은 값을 나타내기 때문에 석탑의 전체적인 거동에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2012~2014년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임

References

1. National Research Institute of Cultural Heritage, "Stone Pagoda of Mireuk Temple Maintenance Design Structure Reports", 2012
2. National Research Institute of Cultural Heritage, "A Study on Collapse Causes of the Stone Pagoda of Miruksa Temple Site using Structural Analysis Reports", 2005
3. 3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide, Itasca Consulting Group, Inc, 2003
4. H.S. Kim, S.I. Hong, "Analysis Method for Masonry Stone Pagoda using Discrete Element Method", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction Vol.23, No.2, 2007
5. S.M. Lee, K.H. Lee, S.W. Park, M.C. Suh, C.H. Lee, "Computational Modelling Method by Using the Natural Frequencies of Five-Story Stone Pagoda in Chongnimsa Site", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.5, 2008
6. National Research Institute of Cultural Heritage, Stone Pagoda of Mireuk Temple Structural Safety Evaluation Reports, 2008
7. Construction Information Company, 21C

- Rock Mechanics, 2008
8. Chonnam National University Press, Theory of Rock Fracture, 2002

(접 수 일 자 : 2014년 02월 24일)

(심사완료일자 : 2014년 03월 21일)

(게재확정일자 : 2014년 04월 07일)