

미륵사지석탑의 구조안전성 평가

Structural Safety Evaluation of the Stone Pagoda in Miruksa Temple Site



김 호 수*



홍 석 일**

*청주대학교 건축공학과 교수

**청주대학교 건축공학과 박사과정

1. 서 론

익산 미륵사지석탑은 현존하는 우리나라 최고(最古) 최대(最大)의 석조 구조물로서, 목조에서 석조로 변안한 우리나라 석탑의 시원적 형식으로 알려져 있다. 따라서 실존하는 고대 목조건축 유구가 없는 상황에서 목구조의 세부적인 특성에 대한 비교적 구체적인 내용을 고찰할 수 있다는 점에서 건축사적 가치가 높다. 지금까지의 미륵사지석탑에 대한 선행연구는 대부분 평면, 입면을 중심으로 한 탑의 양식론적 측면, 의장론적 측면에서 건축적 성격을 논해 온 것이 주된 경향이다. 그러나 미륵사지석탑은 1915년 이전에 2/3 이상이 붕괴된 상태로 남아 있었으며, 연구의 대부분은 1915년에 일본인들이 석탑의 붕괴된 부분을 콘크리트로 응급 보수한 상태를 기초로 하여 진행되어왔다. 이러한 역사적인 석조구조물의 보전 및 복원을 위해 구조적 안전성 평가가 매우 필요하나 건축 구조적 측면에서 석조구조물과 같은 조적식구조물에 대한 해석방법이 명확하지 않아 큰 어려움을 겪고 있으며, 이에 대한 전문적인 연구가 필요한 실정이다. 역사적인 석조구조물들의 포괄적인 해석방법은 일반 연속체 구조물과는 다른 조적식구조물만의 특이한 역학적 거동 특성 때문에 매우 복잡하여 엔지니어들에게는 중요한 도전과제로 남아있다. 조적식구조물은 근본적으로 연속체구조물과는 다른 역학적 거동을

나타내는 불연속체구조물로 다루어야 하며, 불연속면에 큰 변위나 회전이 발생하고 또한 석재의 이동에 따른 불연속면의 새로운 접촉면을 반영할 수 있어야 한다. 일반적으로 구조해석 시 많이 이용하는 유한요소법으로는 이러한 요구성능을 만족시키기에 한계가 있어 불연속면의 역학적 특징을 잘 표현할 수 있는 개별요소법을 사용해야 한다. 이와 같은 개별요소법은 석재사이의 미끄러짐, 석재사이의 큰 변위 및 회전, 균열에 의한 벌어짐, 석재의 완전한 분리, 새로운 접촉면의 탐색이 가능하다. 본 연구에서 사용하는 3DEC 프로그램은 불연속체 모델의 해석을 위해 개별요소법을 사용하는 3차원 수치해석 프로그램으로써 모델링시 블록들을 하나하나 쌓아서 만들게 되는 블록구성 모델과 블록구성 모델 사이의 경계면을 이루고 있는 절리면 모델을 이용하게 된다. 특히 조적식구조물의 모델링시 블록구성 모델은 강제 또는 변형할 수 있는 재료로서 거동되어야 하며, 또한 절리면에 대한 거동, 구조적 부재들과 복잡한 건물들의 모델링 및 훼손된 구조물과 동적해석에 있어 변화성을 잘 표현하여야 한다. 따라서 미륵사지석탑을 모델링하고 개별요소해석 프로그램인 3DEC을 통한 구조해석을 수행하여 안전성을 평가하기 위해, 첫 번째로 연직하중 작용시 각각의 석재부재에 발생하는 응력을 평가하고 두 번째로 석탑을 구성하고 있는 석재의 내구성 저하시 발생하는 응력재분배 현상과 변위 및 붕괴형상을 검토

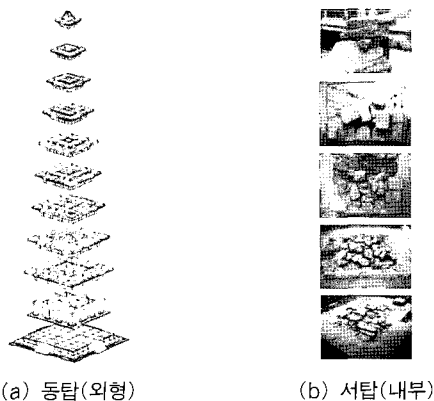
해보고자 한다. 또한 세 번째로 석탑의 지반을 구성하는 연약지반과 경질지반의 경계면의 경사도에 따른 상부석탑의 부등침하 현상의 발생여부를 검토하고, 네 번째로 지진하중의 작용시 발생되는 붕괴형상 등을 검토하며, 마지막으로 석재의 내구성저하 발생 후 지진하중이 작용할 경우의 복합적 원인에 따른 해석을 수행하였다.

2. 자료조사 및 분석

2.1 미륵사지석탑의 축조방식 및 구조해석 모형안

미륵사지석탑의 안전성을 평가하기 위한 구조해석을 수행하기 위해서는 먼저 석탑의 기하학적 형상 및 구성요소들의 역학적 특성이 파악되어야 한다. 미륵사지석탑의 평면구조는 1층에 동서남북 사방으로 통하는 +자형 통로로 구획되는 네 모서리에 방형의 육중한 석축을 배치한 형태로 이루어져 있으며, 탑 내부의 중앙부 중심에 4각형 심주석이 쌓여 있다. 탑의 중심부는 심주석 구조가 없이 트인 중앙 감실로 이루어져 있으며 2중 기단으로 이루어져 있다.

미륵사지석탑은 초기 연구자들의 고찰에 의해 목조변안 석탑으로 밝혀졌다. 그러나 미륵사지석탑에 나타나 있는 목조변안은 매우 추상적이다. 창건을 비롯해서 현재에 이르기까지 연혁을 알아볼 수 있는 기록이 또한 희박하다. 절반 이상 무너져 6층까지의 일부만 남아 있는 현재의 모습은 창건 당초의 층수와 형태에 대한 해석을 어렵게 한다. 더욱이 해체 과정에서 나타난 개축 흔적은 탑의 백제 시대 모습을 추정함에 한계를 느끼도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 미륵사지석탑의 모델링을 위해 외형은 그림 1과 같이 복원된 동탑을 따르고 내부는 현재 서탑의 해체현황을 반영하여 구조해석 모델링 작업을 수행한다.



(a) 동탑(외형) (b) 서탑(내부)
그림 1 미륵사지석탑의 구조해석 모형안

2.2 지반특성조사

1998년에 실시된 "익산 미륵사지석탑 구조안전진단" 보고서의 조사결과를 살펴보면 미륵사지석탑이 위치한 지반은 그림 2와 같이 지반상부의 연약 지반층과 지반하부의 견고한 지반층으로 이루어지며, 동쪽방향으로 약 5° 경사져 있으며 남북방향으로는 비교적 일정하다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 전체 지하구조가 경사진 경우 구조물은 장기적인 슬라이딩 등에 의한 부등침하가 유발될 수 있고 부등침하로 인해 구조체 내부에 추가응력이 발생하거나 조적조 형태인 구조체가 불안정한 상태가 되어 탑의 여러 부위가 연쇄적으로 붕괴될 가능성도 있기 때문에 조사된 지반 상태에 따른 석탑의 거동특성을 파악하기 위해 실제 지반을 고려한 구조해석을 수행하여야 한다.

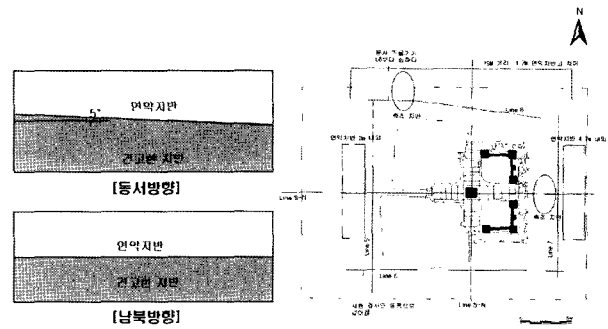


그림 2 지질탐사 측정도

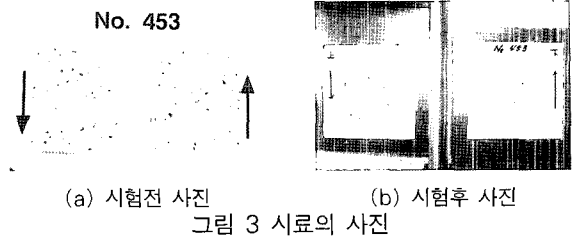
2.3 지진하중조사

미륵사지석탑의 지진하중에 따른 구조해석을 하기 위해서는 다양한 지진기록을 바탕으로 제시된 적절한 지진기록이 필요하다. 또한, 지역적 특성이 반영된 지반운동 가속도를 생성하기 위해서는 그 지역에서 발생한 지진의 장기간에 걸친 기록이 필요하다, 이러한 목적으로 1904년 이전까지 1900여 년간의 역사 지진 목록과 1905년 이후의 계기 지진 기록을 사용한다.

건설교통부 내진설계기준연구(Ⅱ)에 사용된 이와 같은 역사지진목록으로는 다음 표 1과 같은 세 종류의 역사 지진 목록을 사용하였다. 이러한 역사지진기록에 따른 구조해석을 수행하기 위해서는 지진위험도에 따른 설계지진기록이 필요하다. 그러나 우리나라에서는 기록된 지진이 극히 적으며, 이들을 사용하기에도 매우 어려운 실정이다. 따라서 구조물의 시간이력해석에 사용되는 지진기록은 외국의 자료에 의존하는 경우가 대부분이다. 그러나 이들 대부분의 지진기록은 강진기록이며, 지진기록이 계측된 장

표 1 역사지진 목록 (AC 1~1904)

	김우한 외 5명 (지진목록 1)	이기화 (지진목록 2)	김소구 (지진목록 3)
기록된 지진의 수	389	672	1841
규모 또는 진도	MMI V~X	MMI V~IX	ML 3.8~7.6
규모	ML 4.25~6.75	ML 4.25~6.25	ML 3.8~7.6



(a) 시험전 사진 (b) 시험후 사진
그림 3 시료의 사진

표 2 선정된 지진기록 목록 (단단한 지반(S2))

Event Name	Station Name	Date D/M/Y	M	Comp.	PGA cm/sec ²	PGV cm/sec	PGD cm
Ferndale	Eureka Federal Bldg.	10/12/67	5.8	169	21.3	2.3	0.89
2nd Northersn CAL	Eureka Federal Bldg.	10/12/67	5.8	N11W	19.5	-2.82	1.36
Coyote Lake	Gilroy Array No.6	08/06/79	5.8	230	-408.7	43.53	9.30

표 3 3DEC에서 요구되는 재료 성질

분류	블록 성질	절리면 성질
필요한 재료 성질	① 단위부피당 질량	① 절리면 마찰각
	② 탄성계수(E)	② 절리면 점착력
	③ 포와송비(ν)	③ 팽창각
	④ 마찰각(ϕ)	④ 인장강도
	⑤ 점착력(c)	⑤ 절리면 수직강도
	⑥ 팽창각(ψ)	⑥ 절리면 전단강도

소 즉 지반조건도 명확하지 않다. 이에 따라 내진설계를 위한 지진의 설정은 지금까지 알려진 모든 역사지진과 계기지진의 기록을 심층 분석하여 합리적인 지진구역을 결정하고 지반의 특성을 고려하여 그 지반에 적합한 특성을 갖는 설계지진 시간이력을 설정하여야 한다.

표 1의 국내의 역사 지진목록 1~3중 규모가 중첩되는 곳이 대략 ML 4.25~6.25 사이가 되는 것을 알 수 있다. 또한 이를 2005년 제정된 KBC에 규정된 지반조건에 따른 내진규준에 따라 선정된 지진기록 목록 중 단단한 지반(S2)에 적용해 보면 미륵산지석탑의 지진기록은 표 2와 같이 M 5.8의 Ferndale, 2nd Northersn, Coyote Lake의 지진기록으로 압축되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 선정된 지진기록과 역사지진기록 등을 이용하여 지진하중에 따른 미륵산지석탑의 구조해석을 수행하고자 한다.

3. 석탑의 재료특성 시험

석탑의 실용적인 해석 모델링을 구현하기 위해서는 석재의 물리적 특성을 가능한 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 따라서 석탑의 재료특성시험을 위한 시료의 선정을 위해 미륵산지 석탑에 대한 암석의 특성과 채석산지를 조

사연구한 보고서를 검토해본 결과 미륵산지석탑 석재와 동일 종류의 암석은 미륵산의 남쪽 산채를 이루는 흑운모 화강암이라는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 미륵산 석재를 채석하여 그림 3과 같은 시험편을 만들어 블록 특성 시험 및 절리면 전단시험을 수행하여 블록과 절리면의 재료 특성값을 얻었다. 특히 이 재료 특성값은 미륵산지석탑의 구조해석을 위해 사용되는 개별요소해석 프로그램인 3DEC에서 요구되는 표 3과 같은 입력데이터 값으로 적용된다.

블록 특성시험은 석재의 역학적 특성을 파악하는 가장 기본적인 실험으로써 일축압축시험, 삼축압축시험, 인장시험을 수행하여 표 4와 같은 미륵산 석재의 재료특성 값을 측정하였으며, 절리면 전단시험은 불연속면의 물리적 특성을 비교적 정확하게 파악할 수 있는 시험방법으로, 그림 4와 같은 특별한 시험장치를 이용하여, 시험은 통상적으로 수직응력 수준을 몇 단계로 설정하여 각 수직응력 단계에 대해 전단시험을 실시하여 표 5와 같은 미륵산 석재의 절리면 특성값을 측정하였다. 절리면 전단시험방법 순서는 시험 전에 거칠계수(JRC)를 측정하고, 시험을 수행하여 수직강성, 전단강성, 마찰각 등을 계산하며, 시험 후 절리면에 슈미트 해머를 이용하여 절리면의 강도(JCS)를 측정한다.

표 4 미륵산 석재의 재료특성

Sample No.	밀도 (g/cm ³)	압축강도 (MPa)	인장 강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포와송비	체적계수 (MPa)	전단계수 (MPa)	점착력 (MPa)	내부 마찰각 (°)	삼축압축시험 (MPa)	
										구속압력	강도
99-1	2.65	203	10	32.7	0.22	19464	13401			4	236
99-2	2.65	191	12	34.4	0.22	20476	14098			7	279
99-3	2.65	201	13	33.1	0.17	16717	14145	27	57.4	10	318
평균	2.65	198	12	33.4	0.20	18555	13916			7	278

표 5 미륵산 석재의 절리면 특성

Sample No.	면적 (cm ²)	길이 (cm)	JRC value	JCS (MPa)	점착력 (MPa)	마찰각 (°)	수직강성 (K _v) (GPa)	전단강성 (K _s) (GPa)
1	45.8	7.3	6-8	54	0.05	25.9	5.60	6.19
2	41.5	6.5	4-6	55	0.04	26.8	4.93	5.44
3	39.6	6.4	6-8	60	0.01	32.2	4.36	6.11
평균	42.3	6.8	4-8	56	0.03	28.3	4.96	5.91

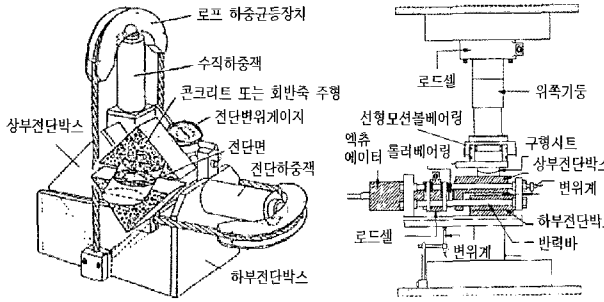
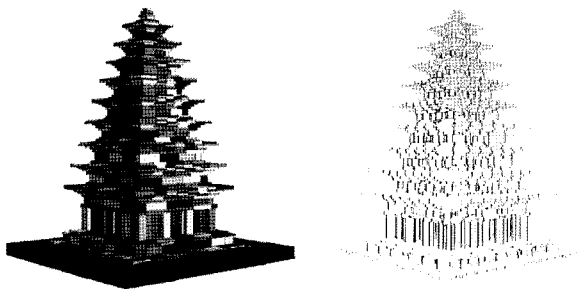


그림 4 절리면 전단시험장치

4. 미륵사지석탑의 안전성 평가

미륵사지석탑의 구조해석을 수행하기 위해서는 먼저 석탑의 기하학적 형상 및 구성요소들의 역학적 특성이 파악되어야 한다. 개별요소법에서는 그림 5와 같이 크게 블록구성모델과 절리면구성모델을 기본으로 모델링을 하게 되는데, 블록구성모델은 변형할 수 있는 블록과 강체 블록으로 나누어진다. 본 연구에서는 두 가지 모델을 혼용해서 사용하게 된다. 석재에 발생하는 응력해석을 위해서는 블록을 임의의 요소로 나누어 생성된 변형할 수 있는 블록을 일반적으로 사용하게 되나, 동적해석을 위해서는 변형할 수 있는 블록은 오랜 해석시간을 이끌게 되고, 또한 적절한 석재를 가지고 쌓아올린 조적식 구조물들의 지진에 의한 변형과 붕괴는 블록과 블록이 만나는 절리면의 구속력이 작아 대부분 절리면의 거동에 의해 결정되기 때문에 강



(a) 블록구성모델 (b) 절리면구성모델

그림 5 미륵사지 석탑의 불연속체 모델

체블록을 사용하였다. 또한 불연속면을 이루고 있는 절리면은 석탑의 경우 블록들이 각각의 면을 경계로 접해있기 때문에 모든 해석시 절리면 면적접촉모델을 이용하여 모델링 하였다.

본 연구에서는 석탑의 안전성 평가를 위해 연직하중에 대한 해석, 석재의 내구성 저하에 대한 해석, 석탑의 지반 침하에 대한 해석, 지진하중에 대한 해석, 석재의 내구성 저하 발생 후 지진하중이 작용할 경우의 복합적 원인에 따른 해석을 수행하였다.

4.1 연직하중에 대한 평가

그림 6은 연직하중에 따른 미륵사지석탑 모델의 구조해석시 발생한 응력분포 형상을 보여준다.

미륵사지석탑 모델에 연직하중이 작용하게 되면, 그림 6과 같이 상륜부, 탑신부, 기단부의 순서대로 압축응력이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 하중을 기단까지 직접 전달하고 있는 기단부의 심주석 부재에 가장 큰 압축응력이 발생한 것을 볼 수 있었다.

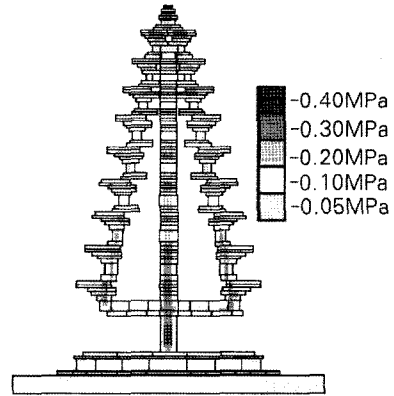


그림 6 연직하중에 따른 기본석탑모델의 응력분포형상

4.2 석재의 내구성저하에 따른 평가

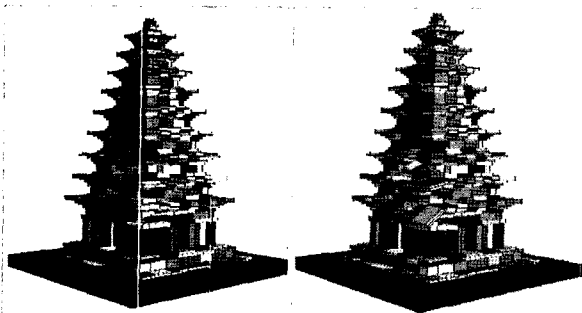
석재의 내구성을 저하시키는 요인으로는 물리적 작용, 화학적 작용, 생물학적 작용 등이 있다. 특히 생물학적 작용에 의한 내구성 저하는 결과적으로 물리적 또는 화학적 내구성 저하를 촉진시키는 원인이 된다. 자연계에 있어서는 대개 물리적 작용에 의한 내구성저하와 화학적 작용에 의한 내구성저하는 동시에 일어난다. 이와 같이 석재의 내구성을 저해하는 3가지 원인으로 인해 석탑을 구성하는 일부 석재가 내구성이 저하 되거나 석탑을 구성하는 모든 석재가 내구성이 저하되면, 국부적인 결함이나 전체적인

결합이 발생하여 구조물의 안전성을 잃게 될 수 있다.

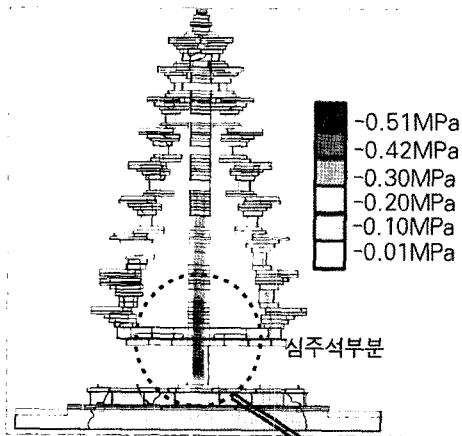
따라서 본 연구에서는 미륵사지석탑의 주요부재가 내구성을 잃게 되어 구조재료의 역할을 하지 못한다고 가정하여 내구성을 잃게 된 부재를 탈락시켜 구조해석을 수행하였다.

그림 7은 석재의 내구성저하에 따른 미륵사지석탑의 붕괴형상을 보여준다. 미륵사지 석탑을 구성하고 있는 주요부재가 내구성을 잃게 되어 구조재료의 역할을 하지 못한다고 가정하여 그 부재를 탈락시키게 되면, 탈락된 주요부재의 상부 석재들의 자중에 의해 석탑이 부분적으로 불안정하게 되어 시간이 진행됨에 따라 석탑이 부분적인 붕괴가 일어나는 현상을 볼 수 있다.

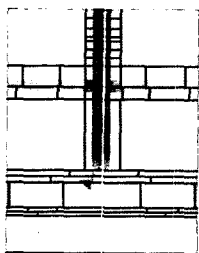
그림 8은 그림 7(b)의 붕괴상태에서 미륵사지석탑의 각



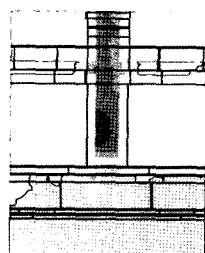
(a) 주요구성부재의 탈락 (b) 붕괴형상
그림 7 석재의 내구성저하에 따른 붕괴형상



(a) 응력분포



(b) 내구성저하 이전



(c) 내구성저하 이후

그림 8 석재의 내구성저하에 따른 미륵사지석탑의 응력분포

석재들에 발생하는 응력분포를 보여준다. 그림 8의 응력분포를 살펴보면 내구성 저하가 일어나기 이전에는 석탑 전체가 매우 안정하여, 기단부의 심주 부분의 응력이 균형을 이루어 분포되어 있으나, 내구성 저하가 일어난 후 석탑이 부분적으로 붕괴된 상태에서는 석탑 전체의 불균형으로 인해 응력의 재분배가 발생하여 기단부의 심주부분의 최대압축응력이 붕괴가 일어난 방향 쪽으로 이동하여 분포하는 것을 볼 수 있다.

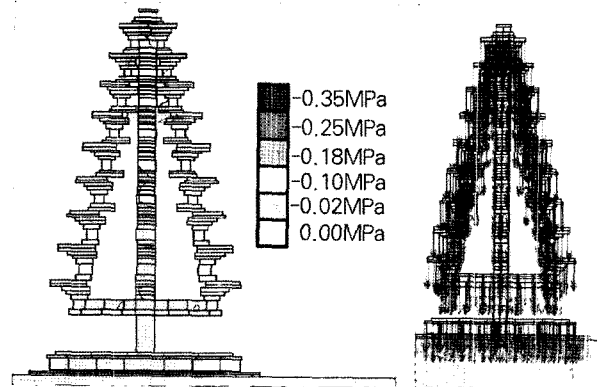
4.3 지반침하에 따른 평가

지반은 연약층의 깊이차·경사면·지하유수방향 등에 의해 부등침하가 생기게 되며 이러한 원인에 의해 균열을 유발시킨다. 지반의 허용침하량 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 비틀림현상이 일어나게 되며, 이는 구조물에 응력요소로 작용하게 되어 대각선 인장균열이 차등적인 침하에 따라서 발생하게 되고 경암반 같은 침하되지 않는 부위는 대체로 중심부위에서 발생하게 된다.

2.2장에서 기술된 미륵사지석탑의 지반현황을 살펴보면,



그림 9 지반특성에 따른 해석모델



(a) 응력분포

(b) 변위분포

그림 10 지반특성에 따른 해석결과

미륵사지석탑의 지반은 동서방향으로 약 5° 동쪽으로 경사지며 남북방향으로는 비교적 일정한 것을 알 수 있다. 이와 같은 지반현황은 부등침하를 유발할 수 있는 가능성을 갖고 있다. 따라서 이를 근거로 하여 지반침하에 따른 해석 모델은 그림 9와 같이 미륵사지석탑의 지반현황을 고려하여 동서방향으로는 5° 동쪽으로 경사지며, 남북방향으로는 일정한 경사를 갖는 연약지반과 경질지반을 형성하고 있는 지반을 모델링 하고 지반상부는 미륵사지석탑모델을 사용하였다.

그림 10은 지반특성에 따른 해석결과를 보여준다. 해석 결과를 살펴보면 실제 미륵사지석탑의 지반이 동서방향으로 약 5° 동쪽으로 경사졌다 하여도 연약지반과 경질지반이 만나는 경계면의 경사가 없는 경우와 거의 비슷한 응력 분포를 보여주고 있으며, 변위 또한 전체적으로 균등하게 침하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 연약지반과 경질지반이 만나는 경계면의 경사도 5°에서는 부등침하 현상을 거의 볼 수 없음을 알 수 있었다.

4.4 지진하중에 따른 평가

미륵사지석탑의 지진하중을 적용한 해석시 석탑의 붕괴 절차를 명확하게 시뮬레이션하기 위해 시간이력해석을 수행하였다. 특히 실제 지진에 의해 석탑에 발생하는 변형과 붕괴가 블록과 블록사이의 구속력이 매우 작은 절리면의 거동에 의해 결정되므로 지진해석시 석탑을 강체블록으로 모델링하였으며, 이 경우 변형할 수 있는 블록구성모델의

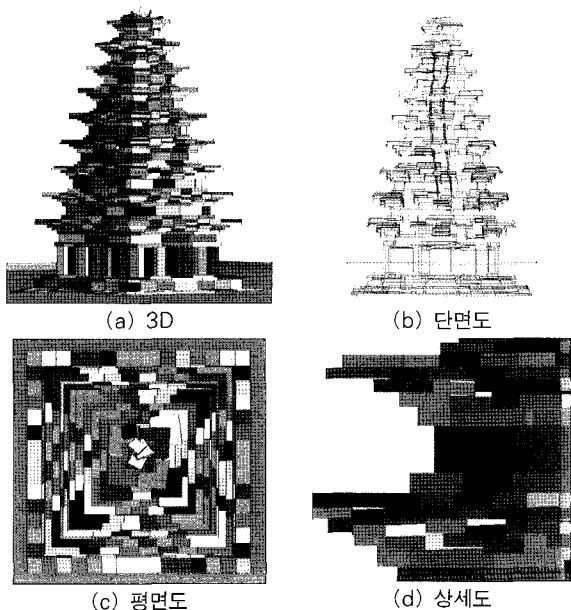


그림 11 미륵사지석탑의 붕괴형상

선택시 발생하게 되는 긴 해석시간 또한 단축시킬 수 있었다. 기본석탑구조물의 해석과 동일하게, 미륵사지석탑구조물도 먼저 자중을 가하고, 선택된 규모 5.8의 Ferndale의 지진기록을 미리 모델링된 기초판에 수평방향으로 입력하였다.

그림 11은 미륵사지석탑에 지진하중 입력시 석탑의 붕괴형상을 보여준다. 지진 발생시 석탑상층부위의 블록들이 먼저 붕괴되기 시작하는 것을 볼 수 있으며, 각 블록들의 결구부가 풀려 부재들이 전체적으로 흐트러져 있는 모습들을 평면도 및 상세도를 통해 자세히 볼 수 있다. 또한 그림 11(b)의 미륵사지석탑 단면붕괴형상을 보게 되면 석탑의 구조적 기능을 하는 심주 부분이 S자 모양으로 변형되는 모습을 볼 수 있었다. 이 현상이 계속 지속되면 상층부위의 블록들이 계속 붕괴되어 부분적으로 충격하중과 편심하중을 발생시키게 되며, 심주부분의 S자 형상의 변형이 더욱 커지게 된다. 또한 각 블록과 블록사이의 결구부에 더욱 큰 구조적결함이 발생되어 전체적인 구조적인 안정성을 잃게 되고 결국 전체적인 석탑의 붕괴를 발생시키는 것으로 판단된다.

4.5 복합적 원인에 따른 평가

미륵사지석탑은 실제 부분적인 붕괴 및 내구성 저하에 의해 실제 불안정한 상태로 전해 내려왔다. 실제로 내구성 저하에 의해 불안정해진 구조물에 지진하중이 발생하는 경우에는 구조물의 더욱 큰 붕괴를 유발시킬 수 있을 것이다. 따라서 이를 고려하여, 그림 12와 같이 내구성저하에

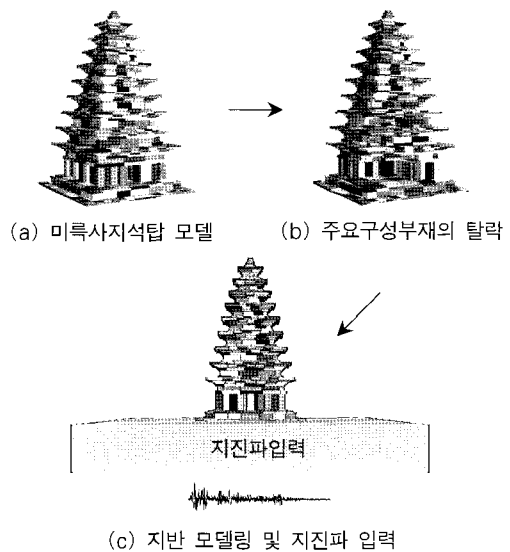
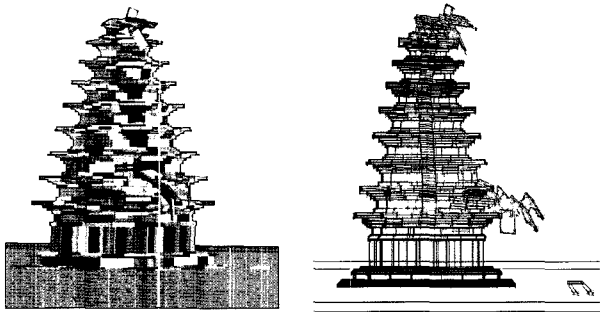


그림 12 주요구성부재의 제거 후 지진하중 입력 모델

의해 불안정해진 구조물에 지진하중을 입력한 경우에 대한 해석을 수행하였다. 미륵사지석탑을 모델링 한 후 내구성이 저하된 석탑의 주요 구성요소에 결함이 발생하였다고 가정하여 그 주요 구성부재를 탈락시킨 후 지반을 모델링 한 후 지진하중을 입력하여 해석시 그림 13과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림 13을 보면 탈락된 주요부재의 상부 석재들의 자중에 의해 석탑이 부분적으로 불안정하게 되고 또한 지진하중의 영향으로 석탑의 구조부재인 심주와 석탑의 상단부가 영향을 받아 부재와 부재사이를 연결하는 결구부의 파괴와 함께 부재가 좌우로 이동하여 석재의 내구성저하에 따른 해석과 지진하중에 따른 해석결과들이 복합적으로 나타나게 되며 더욱 급속한 붕괴를 일으키는 것을 볼 수 있다.



(a) 미륵사지석탑의 붕괴형상 (b) 미륵사지석탑의 단면 붕괴형상
그림 13 주요구성부재의 제거 후 지진하중 입력 후 결과

5. 결 론

본 연구는 미륵사지석탑의 모델링 및 구조해석을 통한 안전성평가방안을 제시하였다.

1) 절반 이상 무너져 6층까지의 일부만 남아있는 미륵사지석탑은 창건을 비롯해서 현재에 이르기까지 연혁을 알아볼 수 있는 기록이 희박하며, 해체 과정에서 나타난 개축 흔적이 탑의 백제시대 모습을 추정하기가 매우 어려워 미륵사지석탑의 모델링을 위해 외형은 복원된 동탑을 따르고 내부는 현재 서탑의 해체현황을 반영하였다. 또한, 미륵사지석탑의 합리적인 구조해석을 위해 개별요소법이 적용되었으며 불연속체 거동을 반영하기 위해 블록구성모델 및 절리면 구성모델이 고려되었다. 특히, 석탑의 정확한 해석 모델링 구현을 위해서 미륵사지석탑의 재료와 가장 근접한 미륵산으로부터 석재를 채석하여 시험편을 제작하고 블록전단시험과 절리면 전단시험을 수행하여 구조해석에 필요한 블록과 절리면의 물리적 특성값을 파악하였다.

2) 미륵사지석탑에 연직하중이 작용하게 되면, 탑두부분의 하중을 탑신부가 지지하고 다시 탑신부의 하중을 모두 기단부가 지지하여, 탑두부, 탑신부, 기단부의 순서대로 응력이 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 미륵사지석탑의 주요부재가 내구성을 상실하여 구조재로의 역할을 하지 못한다고 가정하여 내구성을 잃게 된 부재를 탈락시켜 구조해석을 수행한 결과, 탈락된 주요부재의 상부 석재들의 자중에 의해 석탑이 일부분 불안정하게 되어 부분적인 붕괴가 일어나며, 이로 인한 응력의 재분배가 발생하여 붕괴가 일어난 방향쪽으로 응력이 집중되는 것을 볼 수 있었다. 특히, 미륵사지석탑의 경질지반층과 연약지반층이 만나는 경계면이 동서방향으로 약 5°경사였다 하여도 해석결과는 부등침하현상이 매우 미비하여, 경사방향에 관계없이 거의 균등하게 침하가 발생하였다.

3) 지진하중에 대한 해석시에는 실제 지진에 의해 석탑에 발생하는 변형과 파괴가 블록과 블록사이의 구속력이 매우 작은 절리면의 거동에 의해 결정되므로 강체블록으로 모델링 하였으며, 이 경우 변형할 수 있는 블록구성모델의 선택시 발생하는 긴 해석시간 또한 단축시킬 수 있었다. 이와같이 지진하중 작용시 석탑의 부재와 부재사이의 결구부의 구조적 결함이 발생되거나 심주석의 변형이 커질 경우 석탑은 구조적인 안정성을 잃게 되고, 결국 전체적인 붕괴를 일으킬 것이라 판단된다. 또한 미륵사지석탑에 지진하중과 내구성저하에 의한 요인들이 복합적으로 작용하였다고 가정하여 내구성이 저하되어 결함이 발생된 부재를 탈락시키고 지진 하중을 입력하게 되면, 탈락된 주요부재의 상부 석재들의 자중에 의해 석탑이 부분적으로 불안정하게 되고 또한 지진하중의 영향으로 석탑의 구조부재인 심주와 석탑의 상단부가 영향을 받아 좌우로 이동하는 현상이 복합적으로 나타나게 되어, 석탑의 전체적인 붕괴가 더욱 급속하게 이루어지는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

한국건설안전기술원(1998), 익산 미륵사지석탑 구조안전진단
국립문화재연구원(2003), 미륵사지석탑 해체조사보고서 I
국립문화재연구원(2004), 미륵사지석탑 해체조사보고서 II
(주)지우 엔지니어링(1999), 미륵사지 유구조사 및 가설
공사 지반조사 보고서
문화재관리국(1990), 익산사지동탑 복원설계보고서
김부식(1145), 삼국사기(1984), 조선지진연구소 조선지진목록
대한건축학회(1997), 내진설계기준연구 II, 건설부

- 대한건축학회(2005), 건축구조설계기준, 기문당
- 이회근 외(1997), 응용암석역학, 서울대학교출판부
- 김덕문(2004), 익산사지석탑 목조번안 해석, 한국건축역사학회
- 김봉건(2002), 미륵사지 서탑 실측조사 현황, 건축역사학회, 11(3)
- 이기화(1998), 한반도의 역사지진자료, 지구물리, 1(1)
- 이정인(1997), 불연속면의 특성에 따른 암반사면의 안정성 해석, 사면안정 학술발표회 논문집
- 이현호, 한상환, 이리형(2000), 지진위험도를 고려한 설계 지진기록 선정, 대한건축학회논문집, 6(5)
- 홍석일, 김호수, 정성진, 김옥규, 김덕문, 송하영(2006), 구조해석을 통한 미륵사지 석탑의 붕괴원인 연구, 대한건축학회논문집, 22(5)
- Alberto Drei, Carlos Sousa Oliveira(2000), The seismic behaviour of the Aqueduto da Amoreira, in Elvas using distinct element modelling, Historical Constructions
- Itasca Consulting Group, Inc., (2003), Dimensional Distinct Element Code User's Guide 