

개별요소법을 이용한 미륵사지 석탑의 구조해석

Structural Analysis of Stone Pagoda in Miruksa Temple Site using Discrete Element Method

김 호 수* · 정 성 진** · 홍 석 일***
Kim, Ho-Soo · Jung, Sung-Jin · Hong, Seok-Il

ABSTRACT

The stone pagoda on the Miruksa temple site has a high value as architectural history, because this stone pagoda is one of the oldest and grandest stone pagodas which remain in Korea today.

However, this stone pagoda has remained only six stories of the northeastern part, because this stone pagoda was collapsed at past. Therefore, it is important to know the original structure and form of this stone pagoda. Hypotheses about collapse cause of this stone pagoda are presented as four cases; collapse by earthquake, collapse by fragility of ground, collapse by durability reduction, and collapse by lightning. On the basis of these four collapse hypotheses in this study, we investigate collapse phenomenon through the structural analysis using discrete element method and evaluate collapse causes of this stone pagoda.

Keywords: *discrete element method, stone pagoda in Miruksa temple, structural analysis.*

1. 서론

익산 미륵사지 석탑은 실존하는 고대 목조건축 유구가 없는 상황에서 목구조의 세부적인 특성에 대한 비교적 구체적인 내용을 고찰할 수 있다는 점에서 건축사적 가치가 매우 높다. 그러나, 미륵사지석탑은 1915년 이전에 2/3이상이 붕괴된 상태로 남아 있었으며, 연구의 대부분이 1915년에 일본인들이 미륵사지석탑의 붕괴된 부분을 콘크리트로 응급 보수한 상태를 기초로 하여 진행되어, 붕괴된 상태의 탑은 사실상 본래의 구조와 형태가 변형되어 있다고 볼 수 있으므로, 이를 근거로 하여 당초의 층수와 체감비 등에 관한 연구를 진행할 경우 정확한 결과를 도출하는데 큰 오류를 범할 우려가 있다. 따라서 미륵사지석탑의 본래의 구조와 형태를 밝히기 위해서는 미륵사지석탑의 원형에 대한 연구가 진행되어야 하는데, 붕괴 원인에 따라 석탑의 변형 상태가 다르게 나타날 수도 있기 때문에 붕괴 원인에 대한 규명에서부터 진행되어야 할 것이다. 미륵사지석탑의 붕괴원인은 그 동안 구체적인 연구가 없는 상태에서 三國史記(김부식, 1145)에 기록된 “미륵사에 벼락이 있었다.(秋九月 震金馬郡 彌勒寺)”라는 기록에 근거하여 벼락에 의해 석탑이 붕괴되었다고 추론되었지만, 최근 들어 지진에 의한 붕괴설, 기반구조의 취약함에 의한 붕괴설, 내구력 저하에 의한 붕괴설도 제시되고 있

* 정희원 · 청주대학교 건축공학과 교수 E-mail: hskim@cju.ac.kr

** 정희원 · 한남대학교 건축공학과 교수 E-mail: jsjarch@hannam.ac.kr

*** 청주대학교 건축공학과 박사과정 E-mail: sigreen@paran.com

다. 이러한 붕괴원인에 대해 제시된 안들은 석탑의 현재 상태에 대한 정밀한 실측조사를 토대로 하여 연구되어야 할 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 네 가지 붕괴설을 토대로 미륵사지석탑의 구조해석을 수행하여, 각 붕괴설에 따른 미륵사지 석탑의 붕괴현상을 조사하여 붕괴원인을 분석해본다.

2. 자료조사

2.1. 미륵사지석탑의 축조방식

미륵사지석탑의 구조해석을 수행하기 위해서는 먼저 석탑의 기하학적 형상 및 구성요소들의 역학적 특성이 파악되어야 한다. 그러나 현재의 미륵사지석탑은 절반 이상 무너져 6층까지의 일부만 남아 있어, 창건 당초의 층수와 형태에 대한 해석을 어렵게 한다. 또한, 창건을 비롯해서 현재에 이르기까지 연혁을 알아볼 수 있는 기록이 희박하며, 더욱이 해체 과정에서 나타난 개축 흔적은 탑의 백제시대 모습을 추정함에 한계를 느끼도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 미륵사지 석탑의 모델링을 위해 외형은 그림 1과 같이 복원된 동탑을 따르고 내부는 현재 서탑의 해체현황을 반영하여 구조해석 모델링 작업을 수행한다.

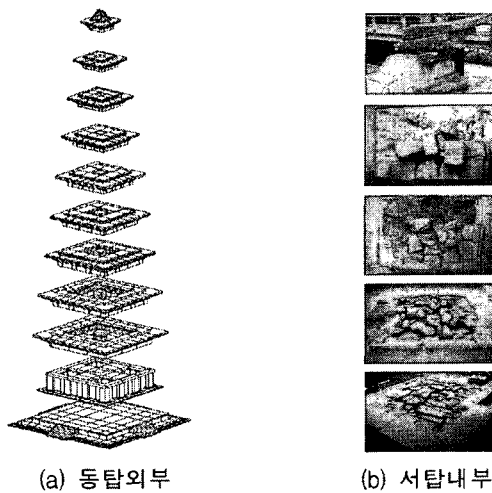


그림 1. 미륵사지석탑의 구조해석 모형안

2.2. 지진하중조사

미륵사지 석탑의 지진하중에 따른 구조해석을 수행하기 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 심층 분석하여 합리적인 지진구역을 결정하고 지반의 특성을 고려하여 그 지반에 적합한 특성을 갖는 설계지진 시간이력을 설정하였다. 교통부 내진설계기준연구Ⅱ(대한건축학회, 1997)에 사용된 이와 같은 역사지진목록으로는 표 1과 같은 세 종류의 역사 지진 목록을 사용하였다. 표 1을 살펴보면 국내 역사 지진목록 1~3중 규모가 중첩되는 곳이 대략 ML 4.25~6.25 사이가 되는 것을 알 수 있다. 또한 이를 2005년 제정된 KBC(대한건축학회, 2005)에 규정된 지반조건에 따른 내진규준에 따라

선정된 지진기록 목록 중 단단한 지반(S2)에 적용해 보면 미륵사지석탑의 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 미륵사지 석탑의 구조해석을 수행하고자 한다.

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

표 2. 선정된 지진기록 목록 (단단한지반(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

2.3. 지반특성조사

미륵사지석탑이 위치한 지반은 그림 2와 같이 지반상부의 연약 지반층과 지반하부의 견고한 지반층으로 이루어지며, 동쪽방향으로 약 5° 경사져 있으며 남북방향으로는 비교적 일정하다는 것을 1998년에 실시된 익산 미륵사지 석탑 구조안전진단보고서(한국건설안전기술원, 1998)의 조사결과를 통해 알 수 있다.

이와 같이 전체 지하구조가 동쪽으로 경사지는 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 지반상태에 따른 석탑의 거동특성을 파악하기 위해 실제 지반을 고려한 구조해석을 수행하여야 한다.

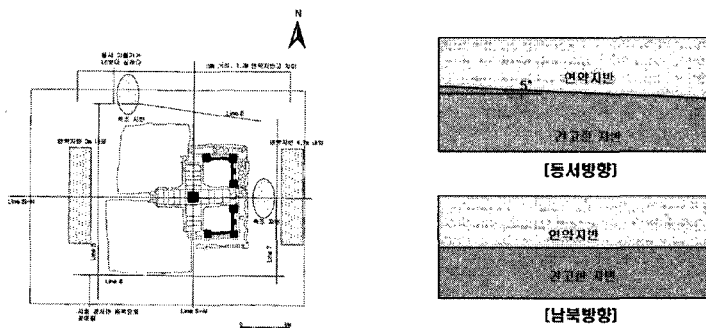


그림 2. 지질탐사 측정도

3. 재료특성

미륵사지석탑의 해석 모델링을 구현하기 위해서는 석재의 물리적 특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 석탑의 재료특성시험을 위한 시료의 선정을 위해 미륵사지 석탑에 대한 암석의 특성과 채석산지를 조사 연구한 보고서를 검토해 본 결과 미륵사지석탑 석재와 동일 종류의 암석은 미륵산의 남쪽 산체를 이루는 흑운모 화강암이라는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 미륵산 석재를 채석하여 시험편을 만들어 블록 특성시험 및 절리면 전단시험을 수행하였다. 블록 특성시험은 석재의 역학적 특성을 파악하는 가장 기본적인 실험으로써 일축압축시험, 삼축압축시험, 인장시험을 수행하여 표 3과 같은 미륵산 석재의 재료특성 값을 측정하였으며, 절리면 전단시험은 불연속면의 물리적 특성을 비교적 정확하게 파악할 수 있는 시험방법으로, 특별한 시험장치를 이용하여, 시험은 통상적으로 수직응력 수준을 몇 단계로 설정하여 각 수직응력 단계에 대해 전단시험을 실시하여 표 4와 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 3. 미륵산 석재의 재료특성

Sample No.	밀도 (g/cm ³)	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포와송비	체적계수 (MPa)	전단계수 (MPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	삼축압축시험 (MPa)	
										구속압력	강도
99-1	2.65	203	10	32.7	0.22	19464	13401	27	57.4	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			10	318
평균	2.65	198	12	33.4	0.20	18555	13916			7	278

표 4. 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

4. 구조해석 및 결과분석

4.1. 미륵사지석탑 모델링

미륵사지 석탑과 같은 조적식 석탑은 근본적으로 불연속체로서 연속체와 다른 역학적 거동을 나타내기 때문에 불연속체로서 다루어져야한다. 또한 석탑의 붕괴원인을 추정하기 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 유한요소법(Finite Element Method)은 이러한 요구성능을 만족시키기

에는 한계가 있다. 반면에 개별요소법(Distinct Element Method)은 석재 사이의 미끄러짐, 석재사이의 큰 변위 및 회전, 균열에 의한 벌어짐, 석재의 완전한 분리, 새로운 접촉면의 탐색이 가능하기 때문에 미륵사지 석탑의 붕괴원인을 추정하기에 적합하다. 따라서 본 연구에서는 현재 가장 널리 쓰이고 있는 대표적인 개별요소 프로그램인 3DEC(Itasca Consulting Group, 2003)을 이용하여 구조해석을 수행한다. 3DEC 프로그램을 이용한 구조해석은 그림 3과 같이 수행된다. 먼저 초기조건에 따라 블록 구성모델과 절리면 구성모델을 이용하여 모델링을 하고, 구조해석을 통해 힘의 평형상태에 수렴시키고, 조건을 원하는 수준으로 변경시킨 다음 해를 구한다. 또한 구해진 모델응답을 검사하고, 추가 대안에 대해 반복 수행한다.

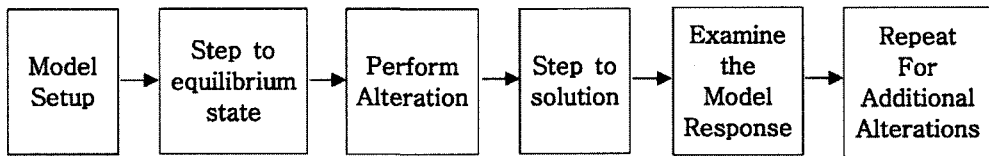


그림 3. 구조해석 과정

개별요소법 및 3DEC프로그램을 이용하기 위해서는 대상구조물인 미륵사지석탑에 대한 양질의 수치적 구조해석 모델링을 하여야 한다. 미륵사지석탑의 구조해석 모델링을 위해 석탑의 블록과 블록사이의 구속력이 작아 불연속면에 의해 구획되는 강체블록들의 운동학적 거동이 주를 이루게 되므로 탄성 블록구성모델을 이용하여 강체블록을 구성하였다. 또한 불연속면을 이루고 있는 절리면은 석탑의 경우 블록들이 각각의 면을 경계로 접해있기 때문에 절리면적접촉모델을 이용하여 모델링 하였다. 또한 블록과 절리면의 입력데이터로 블록과 절리면에 대한 재료성질값을 필요로 하는데, 블록에 대한 재료성질로는 단위부피당 질량, 탄성계수(E), 포와송비(ν), 마찰각(ϕ), 점착력(c), 팽창각(ψ)등이 있으며, 절리면에 대한 재료성질로는 절리면 마찰각, 절리면 점착력, 팽창각, 인장강도, 절리면 수직강도, 절리면 전단강도 등이 있다. 이와 같은 재료성질값은 실험을 통해 얻은 표 3, 4의 재료특성값을 이용하였다.

4.2. 지진하중에 따른 구조해석

그림 4는 미륵사지의 현재 지반현황을 고려하여 지반상부의 연약지반층과 지반하부의 견고한 지반층을 남북방향으로는 비교적 일정하고 동쪽방향으로 약 5° 경사를 둔 지반을 모델링 한 후, 그 지반 위에 다시 블록

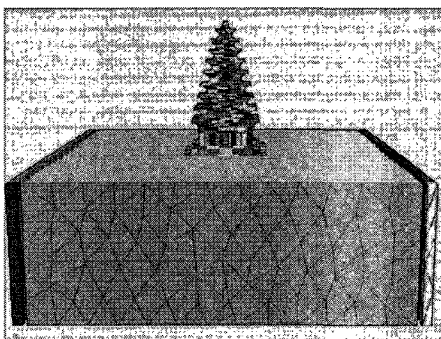


그림 4. 지진해석 모델

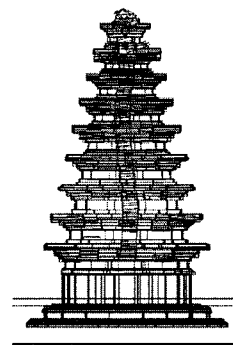


그림 5. 지진해석 결과

구성모델을 이용하여 석탑을 모델링 한 지진해석 모델이며, 그림 5는 지진해석 모델을 이용하여 지진을 입력하여 해석을 수행한 지진해석 결과를 보여준다. 그림 5에서 보는 것과 같이 지진 발생 시 석탑의 구조적 기능을 하는 심주부분이 S자 모양으로 변형되고 석탑 상층부위의 블록들이 붕괴되는 것을 볼 수 있다. 이런 현상이 계속 진행하게 되면 구조체인 심주부재를 구성하고 있는 석재의 결구부가 손상되어 이동하게 되고, 상층부위의 블록들이 붕괴되어 석탑에 부분적으로 충격하중과 편심하중을 발생시켜 결국 석탑의 전체적인 붕괴에 도달할 것으로 판단된다.

4.3. 지반특성에 따른 구조해석

그림 6은 지반침하에 따른 해석 모델을 보여준다. 지반침하에 따른 해석 모델은 미륵사지석탑의 지반현황을 고려하여 동서방향으로는 5° 동쪽으로 경사지며 남북방향으로는 일정한 경사를 갖는 연약지반과 암반층을 형성하고 있는 지반을 모델링 하고 지반상부는 미륵사지석탑모델을 사용하였다.

그림 7은 지반특성에 따른 해석결과를 보여주는데, 해석결과를 살펴보면 실제 미륵사지석탑의 지반이 동서방향으로 약 5° 동쪽으로 경사졌다 하여도 해석을 통한 결과는 경사방향에 따른 부등침하는 매우 미비한 것으로 나타나, 경사방향에 관계없이 거의 균등하게 침하가 발생하는 것을 볼 수 있다.

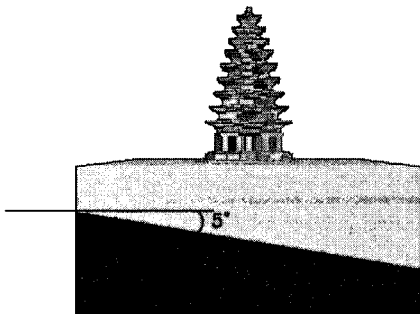


그림 6. 지반특성에 따른 해석모델

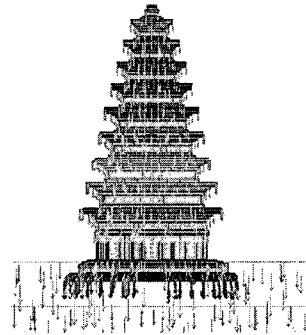


그림 7. 지반특성에 따른 해석결과

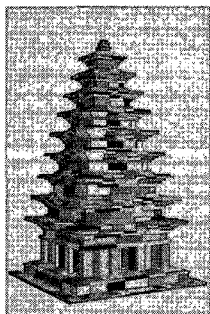
4.4. 석재의 내구성저하 및 벼락에 따른 구조해석

석재의 내구성을 저하시키는 3가지 요인인 물리적 작용, 화학적 작용, 생물학적 작용으로 인해 석탑을 구성하는 일부 석재가 내구성이 저하 되거나 석탑을 구성하는 모든 석재가 내구성이 저하되면, 국부적인 결함이나 전체적인 결함이 발생하여 구조물의 안전성을 잃게 될 수 있다. 하지만, 미륵사지석탑을 이루고 있는 석재들의 현 상황을 고려해보면, 미륵사지 석탑을 이루고 있는 석재 전체가 내구성을 잃게 되는 경우는 극히 희박하며, 국부적으로 내구성을 잃게 될 것이라 판단된다.

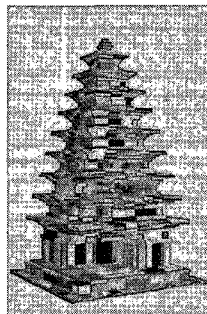
또한, 벼락에 의한 파괴현상으로는 매우 큰 고온에너지로 인한 연소에 의한 파괴와 순간적인 막대한 양의 에너지에 의한 파괴 등을 생각해 볼 수 있다. 이러한 벼락에 의한 파괴로 인해 석탑의 주요구성요소의 국부적인 탈락이나 결함이 발생할 수 있는데, 이와 같은 국부적 결함은 석탑 전체의 안정성을 저해 시킬 뿐만 아니라, 석탑을 이루는 구성요소들의 위치가 바뀌게 되어 구조물의 붕괴를 유발할 수 있다.

그림 8은 석재의 내구성저하 및 벼락에 의해 석탑의 주요 구성요소에 결함이 발생하였다고 가정하여 미륵사지석탑을 구성하고 있는 주요구성부재를 탈락시킨 구조해석 모델이며, 그림 9는 구조해석을 수행 후 발생

한 시간에 따른 붕괴현상을 보여 주고 있다. 그림과 같이 미륵사지 석탑을 구성하고 있는 주요부재가 석재의 내구성저하에 또는 벼락에 의해 구조재로서의 역할을 하지 못한다고 가정하여 그 부재를 탈락시키면 탈락된 주요부재의 상부 석재들의 자중에 의해 석탑이 부분적으로 불안정하게 되어 시간이 진행됨에 따라 석탑이 부분적으로 붕괴되며 붕괴된 주위의 부재에까지 영향을 미치게 되어 결국 석탑의 전체적인 붕괴에 도달할 것으로 판단된다.

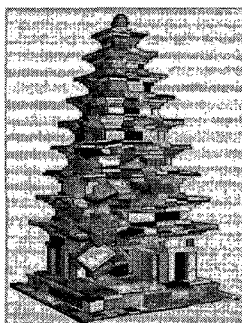


(a) 미륵사지석탑 모델

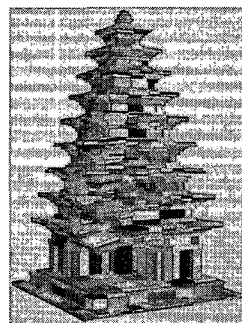


(b) 주요구성부재의 탈락

그림 8. 석재의 내구성저하 및 벼락에 따른 해석모델



(a) 해석진행 1



(b) 해석진행 2

그림 9. 석재의 내구성저하 및 벼락에 따른 붕괴현상

5. 결론

본 연구에서는 미륵사지석탑에 대한 네가지 붕괴가설인 지진에 의한 붕괴설, 지반구조의 취약함에 의한 붕괴설, 석재의 내구성 저하에 의한 붕괴설, 벼락에 의한 붕괴설을 토대로 개별요소해석 프로그램인 3DEC을 이용하여 구조해석을 수행하였으며, 이를 통해 각 붕괴설에 따른 미륵사지 석탑의 붕괴현상을 조사하고 붕괴 원인을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미륵사지 석탑은 현재 절반 이상 무너져 6층까지의 일부만 남아있는 데다가, 창건 후 지금까지 연혁을 알아볼 수 있는 기록이 희박하고, 석탑의 해체 과정에서 개축 흔적까지 나타나, 탑의 원형의 모습을 추정하

기가 매우 어려워 미륵사지 석탑의 모델은 외형은 복원된 동탑, 내부는 서탑의 해체현황을 반영하였다.

2) 미륵사지 석탑의 해석 모델링을 구현하기 위해 미륵사지 석탑의 석재와 가장 근접한 미륵산석재를 채석하여, 시험편을 제작한 후 블록 특성시험과 절리면 전단시험을 통해 블록과 절리면의 물리적 특성값을 파악하였다.

3) 미륵사지 석탑과 같은 조적식 구조체는 불연속체로써 불연속체의 역학적 거동인 석재 사이의 미끄러짐, 석재사이의 큰 변위 및 회전, 균열에 의한 벌어짐, 석재의 완전한 분리와 같은 해석 모델링을 구현하기 위해 개별요소법을 이용하였다.

4) 미륵사지 석탑의 지진해석시 석탑의 구조적 기능을 하는 심주부분이 S자 모양으로 변형되고 석탑 상층부위의 블록들이 붕괴되게 되는데, 이런 현상이 계속 진행하게 되면 구조체인 심주부재를 구성하고 있는 석재의 결구부가 손상되어 이동하게 되고, 상층부위의 블록들이 붕괴되어 석탑에 부분적으로 충격하중과 편심하중을 발생시켜 결국 석탑의 전체적인 붕괴에 도달할 것으로 판단된다.

5) 미륵사지석탑의 지반이 동서방향으로 약 5° 동쪽으로 경사졌다 하여도 해석 결과는 경사방향에 따른 부등침하는 매우 미비하여, 경사방향에 관계없이 거의 균등하게 침하가 발생하였다.

6) 미륵사지 석탑을 구성하고 있는 주요부재가 석재의 내구성저하에 또는 벽력에 의해 구조재로서의 역할을 하지 못한다고 가정하여 그 부재를 탈락시키면 탈락된 주요부재의 상부 석재들의 자중에 의해 석탑이 부분적으로 불안정하게 되어 시간이 진행됨에 따라 석탑이 부분적으로 붕괴되며 붕괴된 주위의 부재에까지 영향을 미치게 되어 결국 석탑의 전체적인 붕괴에 도달할 것으로 판단된다.

7) 이와 같이 본 연구에선 네가지 가설에 의한 구조해석을 통해 직접적인 붕괴현상을 검토하였으나 본 연구결과로 미륵사지석탑의 붕괴원인을 유추하는 것은 어려운 일이다. 이는 역사적으로 정확한 자료가 주어지지 않은 상태에서 붕괴원인을 역으로 추정하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 따라서 네가지 가설들이 복합적으로 작용하여 붕괴가 발생했을 가능성과 또한 기단부의 토사유실에 따른 석탑의 변형 및 기울어짐에 대한 추가 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 국립문화재연구소의 미륵사지석탑 보수정비 사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 한국건설안전기술원 (1998), 익산 미륵사지 석탑 구조안전진단, 전라북도
 국립문화재연구원 (2003), 미륵사지석탑 해체조사보고서 I
 국립문화재연구원 (2004), 미륵사지석탑 해체조사보고서 II
 (주)지우 엔지니어링 (1999), 미륵사지 유구조사 및 가설공사 지반조사보고서
 문화재관리국 (1990), 익산사지동탑 복원설계보고서
 김부식 (1145), 삼국사기, 고려 인종
 강후진 (18세기), 와유록(臥遊錄)
 대한건축학회 (1997), 내진설계기준연구II, 건설부
 대한건축학회 (2005), 건축구조설계기준, 기문당
 이현호 등 (2000), 지진위험도를 고려한 설계지진기록 선정, **대한건축학회논문집**, 제6권, 제5호, pp.37-41
 Itasca Consulting Group (2003), 3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide', *Itasca Consulting Group, Inc.*