

유한요소법을 이용한 진전사지 삼층석탑의 전산해석

Computational Analysis of the Jinjeonsaji Three-Storeyed Stone Pagoda through the Finite Element Method

김군호, 정재웅

경원대학교 기계자동차공학과

Kyun-Ho Kim(kunokim@nate.com), Jaeung Chung(chungae68@kyungwon.ac.kr)

요약

석조 건축물 문화재에 대한 안전 진단은 건축 문화재의 유형별로 각각 다른 기준 및 진단 방법들이 적용되어야 한다. 하지만, 현재까지 석조 건축물에 대한 안전진단을 위해 어떤 항목을 조사하고 어떤 방법으로 진단하여야 하는 것에 대한 방안들이 정립되어 있지 않다. 석조 건조물에 대한 체계적인 보존방안을 위해서는 자중·구조적 결함·자연재해 같은 여러 가지 요인들을 고려해야 한다. 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 전산해석을 통해 현재 상태의 진전사지 삼층석탑의 자중 및 기울기를 측정하였다. 또한, 석탑의 기울기변화가 자중에 의해 탑의 처짐량 및 탑 내부에 발생하는 응력들에 어떻게 작용하는지에 대한 연구되어졌다. 마지막으로, 석탑의 기울기변화에 의한 안전진단기준이 제시되었다.

■ **중심어** : | 진전사지 삼층석탑 | 유한요소법 | 전산해석 | 안전 | 처짐량 | 응력 |

Abstract

In order to examine the safety of stone-built historic properties, it is necessary to apply different methods to the properties according to their categories, respectively. However, there is no consensus for the criteria on which item should be examined. To make systematic preservation plans for the historic stone buildings, it must be requested to consider various factors such as weights, structural imperfections, and natural disasters and so on. In this paper, the Jinjeonsaji three-storeyed stone pagoda were numerically analyzed through the finite element method to measure its weight and slope. In addition, it was studied how slope variations of the stone pagoda affect to the deflections and stresses caused by its weight. Finally, criterions were proposed to examine the safety of the stone pagoda.

■ **keyword** : | Jinjeonsaji Three-Storeyed Stone Pagoda | Finite Element Method | Computational Analysis | Safety | Deflection | Stress |

I. 서론

건축 문화재에 대한 안전 및 현상별 처리 방안에 대한 연구는 주로 국립문화재연구소를 중심으로 수행되

어 왔으며, 위 기관에서는 각 진단 결과를 데이터베이스 형태로 저장한다. 그러나 안전 진단의 경우 석조 건축물 문화재의 유형별로 서로 다르게 적용되어야 하고, 어떤 항목을 조사하여야 하는 지에 대한 명확한 근거가

* 본 연구는 문화관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 문화콘텐츠기술 연구소 육성사업의 연구결과로 수행되었습니다.
접수번호 : #080407-001
접수일자 : 2008년 04월 07일
심사완료일 : 2008년 04월 21일
교신저자 : 정재웅, e-mail : chungae68@kyungwon.ac.kr

존재하지 않는다. 따라서 현상별·유형별 진단 지표를 체계적으로 구축하여야 하고, 이에 대한 연구가 필요하며, 현상별·유형별 처리 방안 역시 진단결과에 따라서 체계적인 방안을 제시할 수 있어야 한다. 그 중 석조 건축 문화재들은 문화재의 구조적 결함, 자중, 재질의 부식 및 바람, 지진 등의 자연 재해 같은 여러 가지 요인들에 의한 파손의 위험성이 존재한다[1].

이에, 본 논문에서는 진전사지 삼층석탑을 통해 유한 요소법을 이용한 전산해석을 도입하여 석탑의 파손에 영향을 끼치는 여러 인자 중 석탑의 자중과 기울기의 변화에 의한 영향과 취약 부위의 변화를 알아보고 예측해보고자 한다.

II. 석재 건축 문화재의 안전진단

1. 석재 건축 문화재의 특성

1.1 석재의 특성

건축 문화재의 재질에 대한 중요성은 문화재의 보강이나 복원 시에 나타나는데, 보강이나 복원 시에는 원래의 재질과 동일한 재질을 사용해야 하기 때문이다[2]. 과거 문화재들은 석재나 목재를 주로 건축 재료로 사용하였으며, 이중 불탑과 같은 건축 문화재는 대부분 석재를 이용했다. 석재는 가공되거나 천연의 암석을 사용한 것으로서 우리나라 문화재들은 구하기 쉽고 강도와 내구성이 뛰어난 화강암을 주로 사용하였다[3]. 일반적으로 석조문화재에 사용된 화강암들은 재질이 균질하지 않고 주변 환경과 시간의 흐름 속에 풍화와 부식이 일어나기 때문에 같은 종류의 화강암이라도 사용된 위치와 시간에 따라 물리적 특성들이 달라지는 경향이 있다. 따라서 정확한 문화재의 안전진단을 수행하기 위해서는 일반적인 화강암의 물리적 특성을 이용하기보다는 석조문화재에 사용된 화강암의 물리적 특성을 정확히 측정하여 적용해야 한다. 이러한 석조 문화재 재질의 물리적 특성을 측정하기 위해서 일반적으로 비파괴 검사가 수행되어진다[4]. 하지만, 본 논문에서는 비파괴 검사를 실시하지 못했기 때문에 자료 수집을 통해, 기존에 측정이 실시되었던 건축물인 공주 천진보탑의 물

리적 특성을 적용하여 진단을 실시했다.

1.2 진전사지 삼층석탑의 특성

진전사지 삼층석탑[그림 1]은 1966년 국보 제 122호로 지정되었으며, 강원 양양군에 위치한 통일신라 8세기 후반에 건조된 불탑으로 진전사의 옛터에 서 있는 높이 약 5m의 3층 석탑이다[5]. 통일신라 석탑의 전형적인 모습으로, 2단의 기단 위에 3층의 탑신을 올려놓은 모습이다. 아래층 기단에는 천의 자락을 훑날리는 비천상(飛天像)이 사방으로 각각 둘씩 모두 여덟이 양각되었고, 위층 기단에는 구름 위에 앉아 무기를 들고 있는 팔부신중(八部神衆)이 사방에 둘씩 양각되었다. 1층 탑신에는 사방불(四方佛) 각 면마다 양각되어 있다. 지붕돌은 처마의 네 귀퉁이가 살짝 올라가 경쾌하며, 밑면에는 5단씩의 받침을 두었다. 3층 상륜부(相輪部)에는 머리장식은 모두 없어지고 노반(露盤)만 남아있는 것으로 알려져 있다[6].

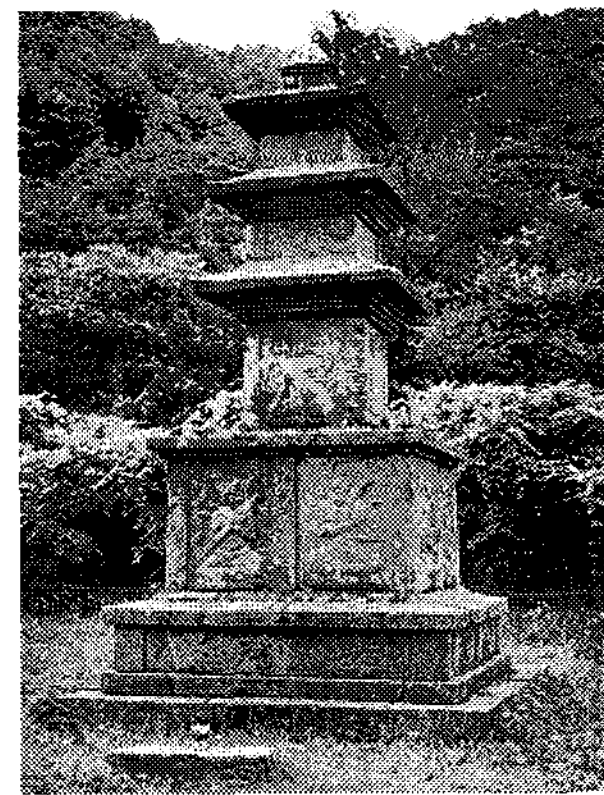


그림 1. 진전사지 삼층석탑

2. 석재 건축 문화재의 유한 요소 해석

본 논문에서는 유한요소법(F.E.M: Finite Element Method)을 이용한 유한 요소 해석을 통해 건조물 문화재의 구조와 안전 상태를 진단하였다. 이를 위해 F.E.M 모델링과 해석 후 결과를 정확하게 분석하기 위한 F.E.M Pre 및 Post Processor로 Altair 社의 Hypermesh 소프트웨어를 사용했으며, 전산 해석을 위한 Solver로는 범용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus

소프트웨어를 사용했다.

2.1 측정 데이터의 문제점

정확한 F.E.M 모델링을 하기 위해 문화재 관련 전문 기업의 측정 데이터를 사용하기로 했다. 하지만 상용 데이터 입에도 불구하고 기존의 데이터를 Hypermesh 프로그램에서 import 했을 때, 모델링에 사용할 수 없을 만큼 문제점이 많이 발견되었다. 문제점들을 종류에 따라 구분해보면 데이터의 비 확실성과 mesh의 중복, 불량, 부재 등이 있다. 문제점들에 대한 보다 상세한 설명은 다음과 같다.

(1) 데이터의 비 확실성

스캔 데이터 상에서의 탑의 크기와 실제 탑의 크기의 비율, 축척이 통일되지 않았다. 1:1 축척의 데이터가 있는가 하면, 1:1000의 축소된 데이터 또한 존재하기 때문에 정확한 F.E.M 해석을 위해서는 이 역시도 변환이 필요하다.

(2) mesh의 중복

문화재 전문 기업들의 스캔 데이터는 2D element로 이루어진 삼각형 mesh로 이루어졌다. 하지만 스캔 이후에 후처리 과정에서 생긴 오류로 보이는 문제점들이 발견 되었는데 이것은 삼각형 mesh들 사이에 또 다른 삼각형 mesh가 끼어있거나 중복되어 있는 문제점이다. [그림 2]의 a 부분 안의 mesh가 문제가 되는 부분으로 mesh들 사이에 또 다른 삼각형 mesh가 끼어있는 모습이다.

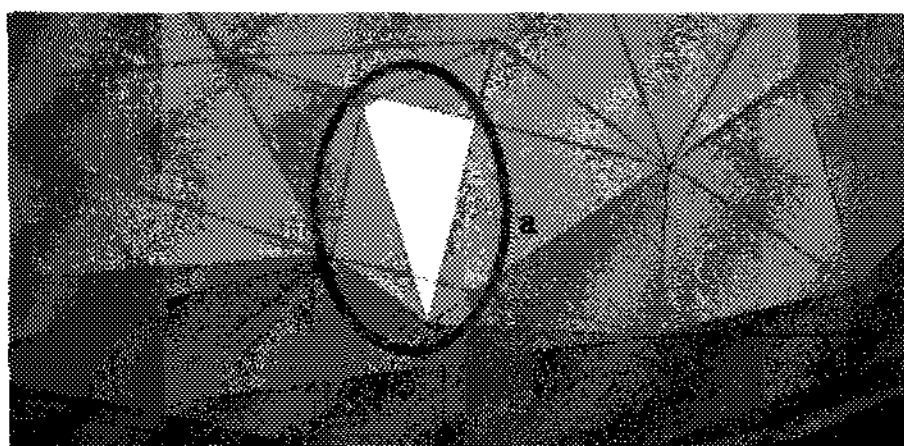


그림 2. 사이에 낀 mesh

(3) mesh의 불량

이 문제는 삼각형 mesh가 F.E.M 해석에 사용하기에는 부적합한 경우이다. mesh의 모양은 삼각형이나 사각형의 다각형을 이루어야 하는데, 이와 같은 경우에는 mesh의 모양이 육안으로는 직선으로만 보일 정도로 다른 삼각형이나 다각형에 비해 많이 훼손된 경우이다. [그림 3]의 a 부분이 문제가 되는 부분으로써, a 안의 mesh는 해석에 사용되기 부적합하다.

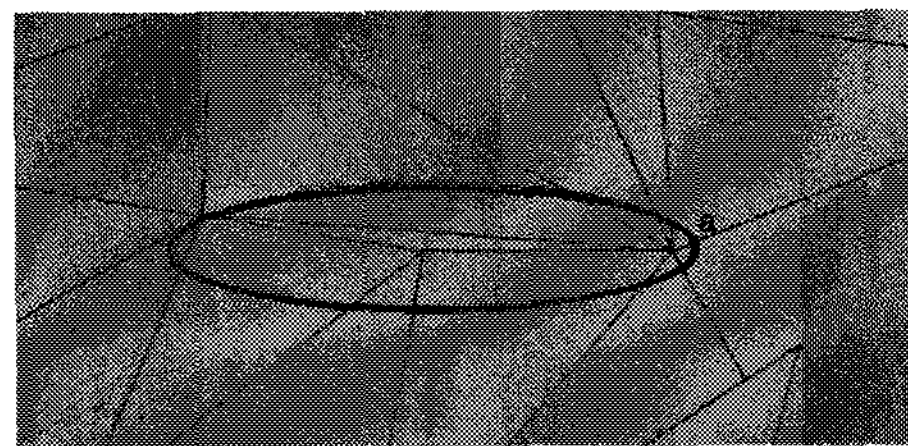


그림 3. 불량 mesh

(4) mesh의 불량

이것은 데이터 일부분에서 mesh가 없는 빈 공간이 생기는 경우이다. 삼각형 mesh가 존재하지 않아서 빈 공간이 생기거나 mesh가 넓은 부분에 걸쳐서 존재하지 않아서 부재들이 연결이 되지 않은 것처럼 보이는 문제이다.

[그림 4]는 빈 공간이 생긴 모습으로 a 원안의 흰 색 삼각형 부분이 mesh가 존재하지 않는 부분이고 [그림 5]는 mesh가 넓은 부분에 걸쳐 존재하지 않는 모습으로써, b 안의 부분이 mesh가 존재하지 않아서 연결이 되지 않은 모습이다.

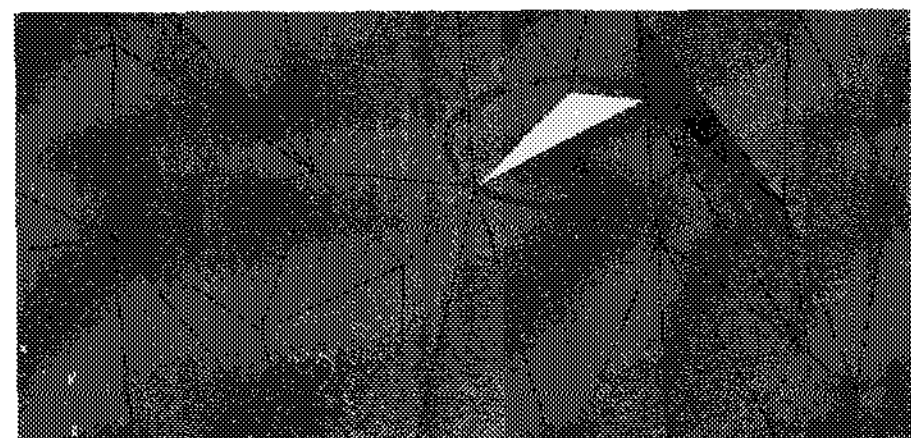


그림 4. 빈 공간이 생긴 mesh

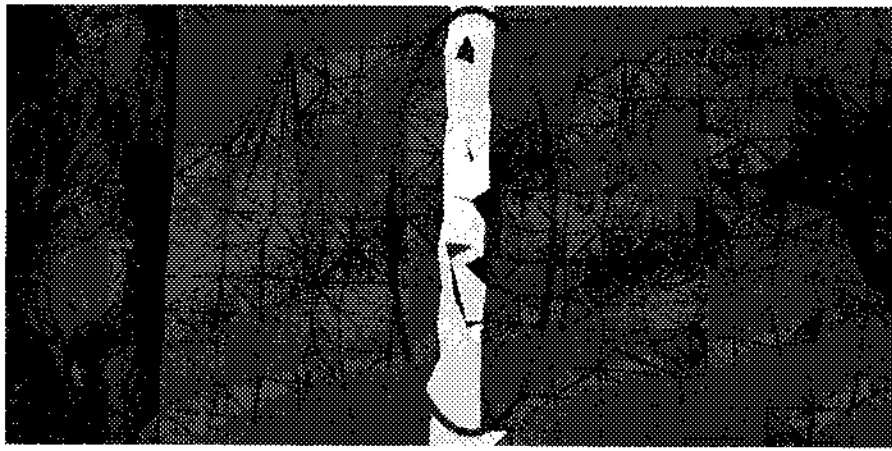


그림 5. 연결되지 않은 mesh

2.2 문제 데이터의 원인

3D 측정 데이터의 문제점은 대부분 스캔과 정합 과정에서 발생하게 된다. 3D 측정의 과정은 다음과 같다.

- ① 좌표 측정 및 광대역 스캔
- ② 데이터 1차 정합
- ③ 정밀 스캔
- ④ 광대역 스캔 데이터, 정밀 스캔 데이터의 2차 정합
- ⑤ 후처리

이 때, 스캔 과정에서 생기는 스캔구간 누락, 좌표의 오류, 스캔 대상과 스캐너와의 각도 오류와 후처리 과정 중에 왜곡 구간과 노이즈 등을 제거하는 과정에서 데이터의 오류가 주로 발생하는 것으로 알려져 있다[7].

2.3 유한요소법(F.E.M.) 해석 순서

석탑의 구조 안전 진단을 위해 먼저 모델링을 실시하며 모델링 과정은

- ① 3D 스캔데이터의 *.dfx 파일 추출, Hypermesh 프로그램에서 *.hm 파일로 변환
- ② 변환된 3D 스캔데이터의 불량 2D mesh를 양질의 2D mesh로 재 모델링
- ③ 재 모델링된 2D mesh를 이용하여 탑의 Surface 생성
- ④ 생성된 Surface 에 2D element mesh 재생성
- ⑤ 재 생성된 2D mesh를 이용해서 3D element 생성의 과정을 거쳐 3D element로 이루어진 구조물을 모델링한다. ②, ③번 과정이 필요한 이유는 컴퓨터 성능의 한계로 인해 해석을 수행하기 위한 유한요소 모델의 요소 수들의 수를 감소시키기 위함이다.

석탑 구조 안전 진단을 위한 F.E.M 해석은

- ① 석탑의 외형적 비틀림 측정
- ② 임의로 나눈 부재별 무게 중심의 측정을 통해 석탑의 기울어짐 측정
- ③ 화강암의 자중을 고려한 응력해석

의 순서로 해석을 진행한다. 그리고 석탑에 임의의 기울기를 설정하여 위 과정을 반복 실행하고 각각의 결과를 비교 분석한다.

3. 유한요소해석

진전사지 삼층석탑은 기단을 포함해 임의로 10개의 부재로 나누었다. 석탑의 안전진단을 위해 사용된 F.E.M Model의 경우, 모든 부재가 연결되어 있는 Model로써, 실제 석탑과는 각 부재의 연결 상태가 다르며, 처음 3D 스캔 데이터의 2D element 수는 약 37만개이며, 재 모델링 후 2D element의 수는 12만개이고, 3D element의 수는 약 45만개이다.

탑에 대한 구조 안전 진단을 위한 F.E.M 해석 시, 진전사지 삼층석탑에 사용된 화강암 물성치에 대한 정보 부재로 인해, 자료 수집을 통해 얻은 공주 천진보탑의 물성치들(밀도 = $2.472 \times 10^{-5} N/mm^3$, 영률 $E = 13047.3 N/mm^2$, 프와송비 = 0.25)을 적용하여 탑에 대한 구조 안전 진단을 위한 F.E.M 해석을 수행하였다[8]. 보다 정확한 안전 진단을 위해서는 화강암의 물성치의 적용에 있어서 각 탑에 사용된 석재의 코어시편을 채집하여 초음파검사 또는 인장 시험기를 이용한 실험 등을 통해 정확히 측정되어야 한다[9].

F.E.M 해석을 위해 설정한 탑의 경계조건은 기본적으로 지면과 접촉하는 기단의 바닥면[그림 6]의 붉은 면)은 상하로의 움직임(Y축 방향)이 없도록 고정하고, 그림 6의 A점은 X, Y, Z 축의 움직임, B점은 Y, Z 축의 움직임, C점은 Y축 움직임, D점은 X, Z 축의 움직임을 고정했으며, 탑의 자중을 하중으로 설정하였다[10].

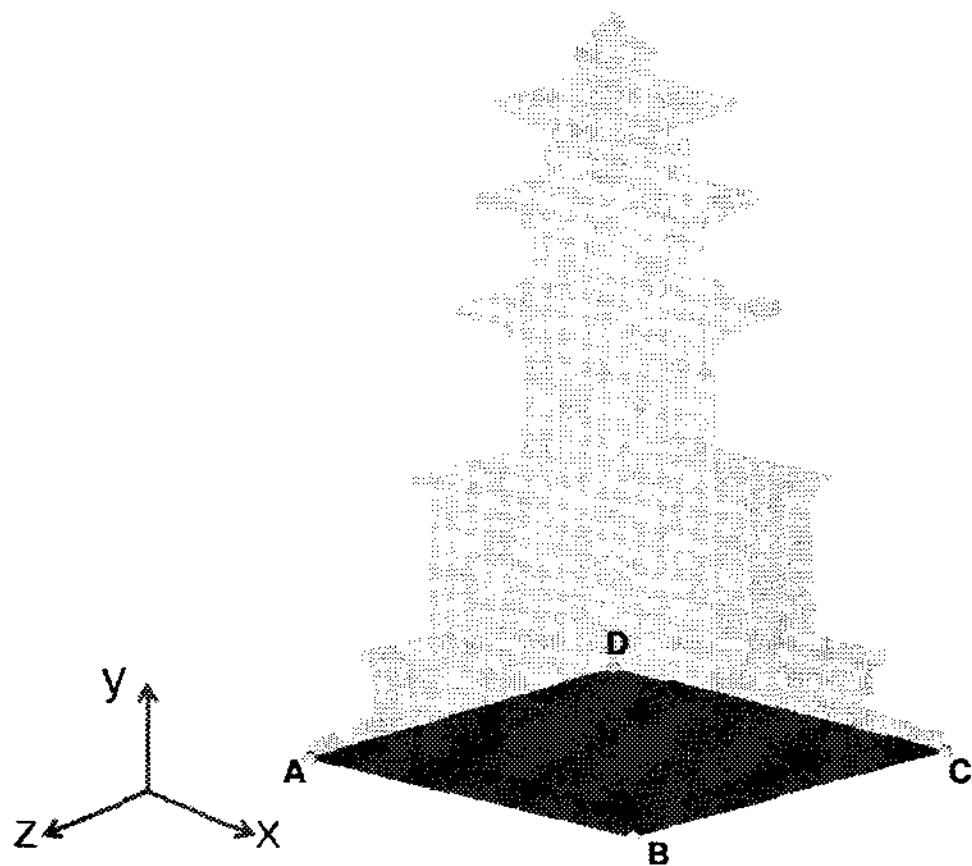


그림 6. 석탑의 경계조건

본 연구에서는 석탑의 안전진단을 위해 모두 4가지의 경우, 즉 현 상태의 탑과 현 상태보다 각각 1°, 3°, 5°가 더 기울어진 경우에 대한 탑의 자중에 대한 안전진단을 F.E.M 해석을 이용하여 수행하였다. 탑의 내부공간에 대한 정보부재로 인해 탑 내부 공간은 빈 공간이 없다고 가정하고 F.E.M 해석을 실시하였다.

3.1 모델링

다음 [그림 7]은 3D 스캔 한 모델이고 [그림 8]은 스캔 데이터의 문제점을 모두 수정 후 다시 mesh 작업을 한 후의 모습이다. 앞에서 언급했던 문제들의 수정을 위해 전체적인 Model을 수정했으며 [그림 7]의 a 부분과 [그림 8]의 b 부분을 비교해보면 불량 mesh들이 개선된 것을 알 수 있다.

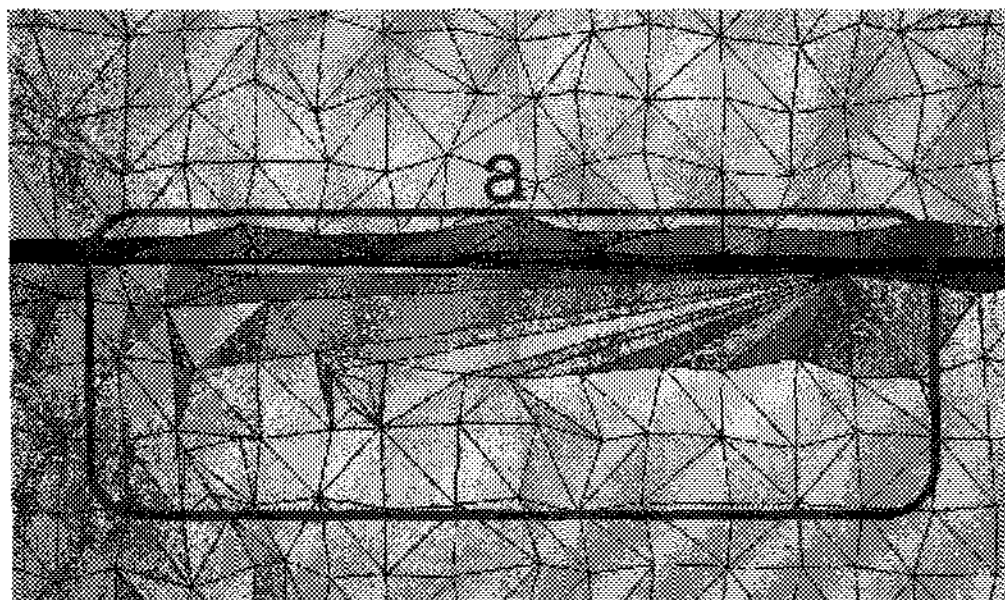


그림 7. 3D 스캔 모델

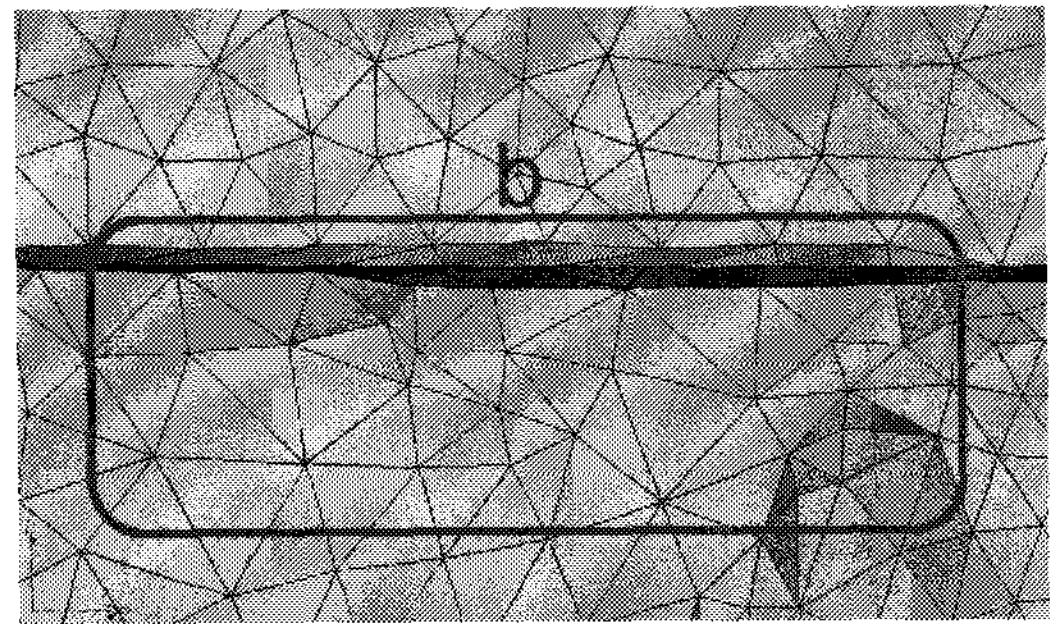


그림 8. mesh를 재구성 한 모델

다음 [그림 9]는 불량 mesh들을 모두 수정한 후 3D 모델링이 완료된 석탑의 모습이다.

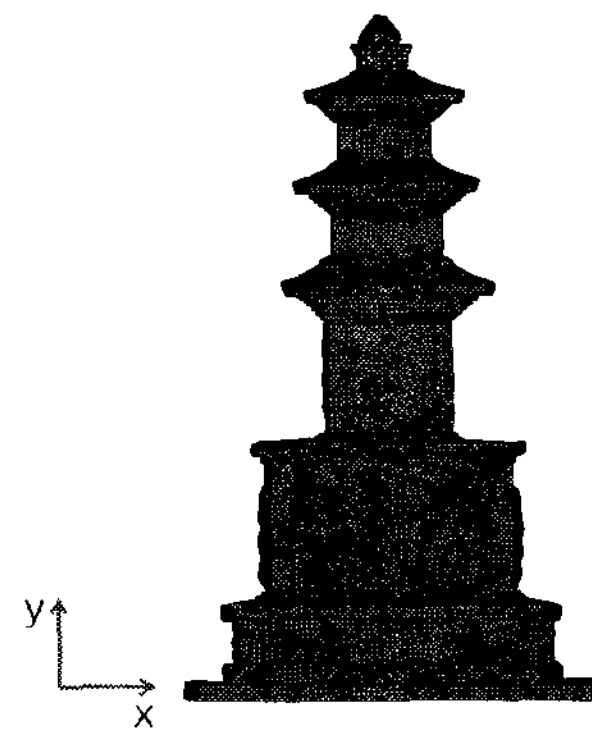


그림 9. 석탑의 완성된 3D 모델링

3.2 외형의 비틀림 측정

다음 [그림 10]의 왼쪽은 모델링 후 Surface를 생성한 모습이고 [그림 10]의 오른쪽은 외형의 비틀림 정도를 쉽게 알 수 있도록 각 부재의 가장 외곽 표면만 표시한 그림이다. 그리고 [그림 11]은 상단부에서 내려다 본 모습이다. 외형의 경우 육안으로는 1층의 옥개석이 약간 틀어진 것을 확인할 수 있지만, 다른 층의 옥개석과 탑신은 그러한 현상이 나타나지 않기 때문에 탑 전체적인 모습에서는 문제가 없는 것으로 보인다.

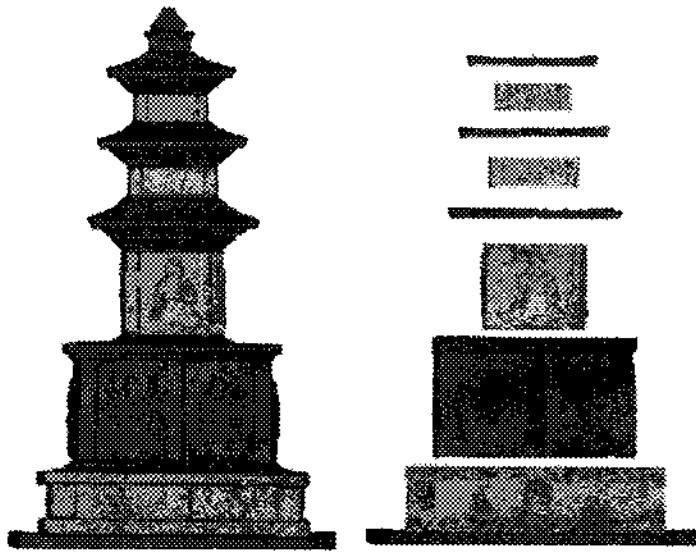


그림 10. surface 생성과 surface 외곽 표시

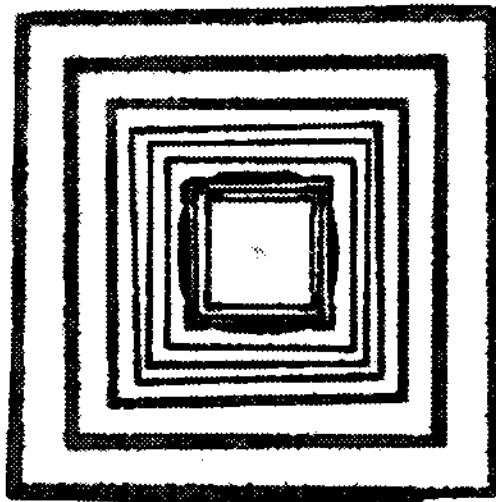


그림 11. 상단에서 내려다 본 모습

3.3 무게 중심에 의한 비틀림 측정

현재 진전사지 삼층 석탑의 경우 기단 바닥면과 노반의 윗면을 기준으로 하면 약 0.43° 기울어져 있는 상태이며, 앞으로의 기울기에 따른 F.E.M 해석은 현 상태보다 각각 1°, 3°, 5°의 기울기를 더 주었기 때문에 실제 기울어진 각도는 1.43°, 3.43°, 5.43°인 진전사지 삼층 석탑에 대한 해석이 될 것이다.

[그림 12]는 임의로 나눈 석탑 각 부재의 무게 중심을 밑에서부터 번호를 새긴 후 측면(XY 평면)에서 보았을 때의 모습이다.

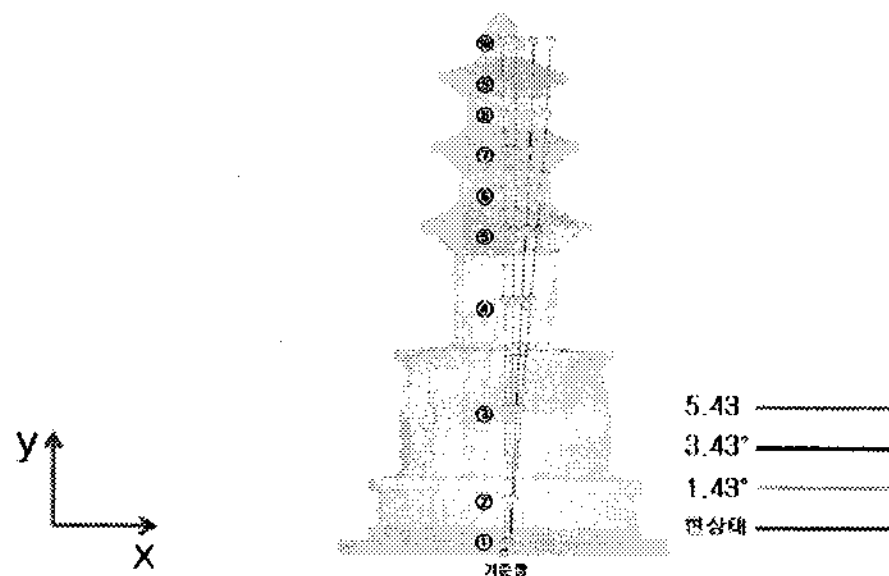


그림 12. 기울기에 따른 각 부재의 무게 중심점의 비틀림

표 1. 기울기에 따른 기단과 각 부재의 무게 중심점의 비틀림 각

기울기 부재 No.	현상태	1.43°	3.43°	5.43°
①	9.29°	12.27°	13.37°	14.4°
②	3.73°	3.76°	3.93°	4.16°
③	1.07°	1.25°	1.24°	1.28°
④	0.47°	0.55°	0.62°	0.7°
⑤	0.19°	0.3°	0.37°	0.44°
⑥	0.26°	0.37°	0.44°	0.52°
⑦	0.22°	0.32°	0.4°	0.48°
⑧	0.21°	0.28°	0.36°	0.44°
⑨	0.17°	0.2°	0.28°	0.36°
⑩	0.3°	0.31°	0.37°	0.44°

기단부의 바닥면을 기준으로 각 부재의 무게 중심과 비교를 해보면[표 1] 기울기에 따라 1번 부재가 9.29°~14.4°로 가장 많이 틀어져 있었고, 9번 부재가 0.17°~0.36°로 가장 적게 틀어져 있다. 1,2번 부재가 다른 부재들에 비해 무게중심의 비틀린 정도가 큰 것을 알 수 있지만 두 부재가 다른 부재들에 비해 길이가 짧고 하단에 위치해 있기 때문에 탑의 안전에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.4 자중 및 기울기를 고려한 구조해석

0.43° 기울어져 있는 현 상태의 석탑의 자중에 대한 안전진단을 위해 유한요소해석이 수행되었다. 또한, 기울어진 정도에 따른 석탑의 안전성 평가를 위해 현 상태의 탑보다 각각 1°, 3°, 5°의 기울기를 더 주었을 경우 즉, 각각 1.43°, 3.43°, 5.43° 기울어진 탑에 대한 유한요소해석이 수행되었다. F.E.M 해석에서 하중으로 주어진 석탑의 무게는 약 27520kgf ($2.697 \times 10^5 N$) 이고, 부피는 10.91m³이다.

[표 2]를 보면 기울기에 따라 자중에 의한 최대처짐량과 최대발생응력을 알 수 있고 기단하단부의 움직임을 고정했기 때문에 최소처짐량은 0이며, 발생응력의 최소값 또한 0.000116MPa ~ 0.000145MPa로 0에 가까운 값이기 때문에 0이라고 볼 수 있다.

표 2. 기울기에 대한 최대, 최소 처짐량과 발생응력

변위 \ 기울기	현상태	1.43°	3.43°	5.43°
최대처짐량(mm)	0.0162	0.0168	0.0201	0.0242
최소처짐량(mm)	0	0	0	0
최대발생응력(MPa)	0.299	0.283	0.343	0.404
최소발생응력(MPa)	0	0	0	0

[그림 13]을 보면 처짐량은 기울기가 커짐에 따라 증가하고 하층에서 상층으로 갈수록, 내부에서 외곽 쪽으로 갈수록 커지며 기울기에 상관없이 노반부에서 처짐이 생기는 쪽의 외곽 부분에서 처짐량이 최대가 된다. 그리고 기울기가 커질수록 처짐이 생긴 쪽의 처짐량이 커지는데 이것은 무게중심의 쏠림현상으로 이어져서 붕괴의 위험을 높일 수 있다.

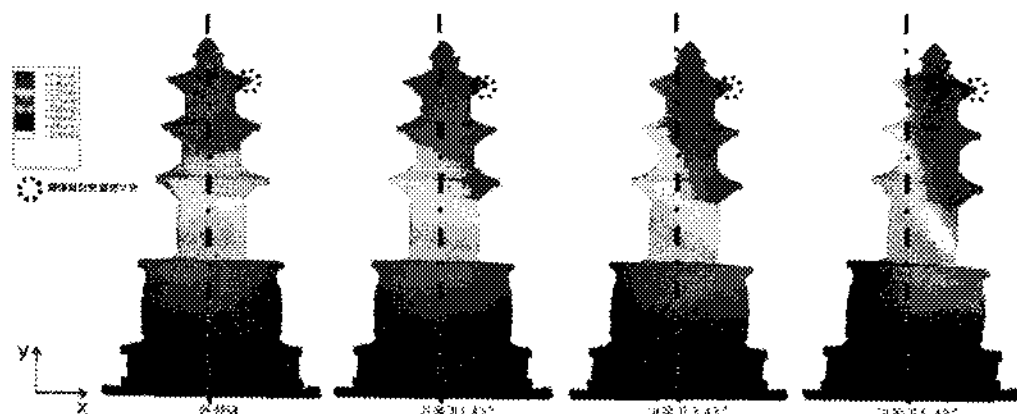


그림 13. 기울기에 따른 처짐량 분포 변화

[그림 14]를 보면 발생응력들의 분포를 알 수 있는데, 각층의 옥개석과 기단의 외곽 부분은 분포된 응력 값들이 매우 작으며 석탑의 내부로 갈수록 응력 값들이 커지는걸 알 수 있다. 또한 각 층의 탑신을 살펴보면 옥개석과 반대로 내부로 갈수록 응력 값들이 작아지는 분포 현상을 보이며, 모든 기울기에서 1층의 탑신과 기단부분이 맞는 곳에서 최대발생응력 값이 나타나고 있고 각층의 옥개석과 탑신이 맞는 부분들 또한 각 층에서 가장 큰 응력분포를 보인다.

증가되는 기울기에 따라서 비교해 보면 처짐량과 마찬가지로 처짐이 생기는 쪽으로 큰 값의 응력분포가 이루어지는 것을 확인할 수 있는데 이것은 탑신부에서 더 확실한 차이를 볼 수 있다. 기울기가 커지게 되면 탑신의 응력분포 또한 변화를 나타낸다. 탑신의 내부와 외곽 부분에서 차이를 보이던 응력분포는 기울기가 커질수록 내부와 외곽 부분의 응력은 같아지고 처진 부분과

처지지 않은 쪽(그림에서 왼쪽과 오른쪽)에서 확연한 응력분포의 차이를 볼 수 있다. 이것은 큰 차이는 아니지만 옥개석에도 비슷한 현상을 볼 수 있으며, 기울기가 증가함에 따라 무게중심이 처진 방향으로 쏠림으로써 하층 또한 작용하는 크기가 달라지기 때문이다.

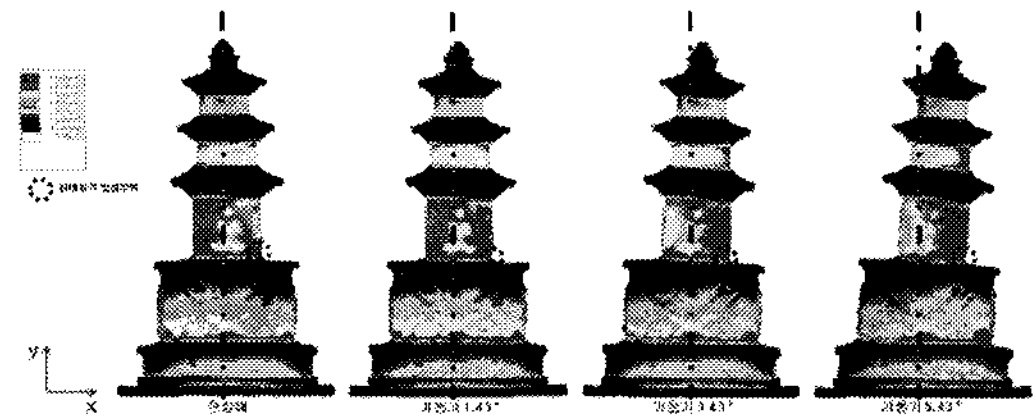


그림 14. 기울기에 따른 발생응력 분포 변화

[표 3]은 진전사지 삼층석탑의 현 상태 대비 기울기 변화에 따른 최대처짐량과 최대발생응력의 증가율을 나타내고 있다. [표 3]을 보면 최대처짐량 측면에서 볼 때, 1.43° 탑(현 상태보다 1° 더 기울어진 경우)의 경우, 현 상태 대비 3.7% 증가하여 더 악화되었고 3.43°와 5.43°의 경우, 각각 24.07%와 49.38% 악화되었다. 차중에 의해 탑에 발생하는 최대발생응력은 1.43° 기울어진 경우, 현 상태 대비 5.35% 감소하지만 3.43°와 5.43°의 경우, 각각 14.72%와 35.12% 악화되었다. [표 3]에 나타난 최대처짐량 및 최대응력에 대한 발생부위는 탑의 기울어진 정도에 상관없이 모두 유사한 위치에서 발생한다. 최대처짐량의 경우 [그림 13]을 보면 기울기에 상관없이 노반부에서 처짐이 생기는 쪽의 외곽부분에서 발생하며 최대발생응력의 경우 [그림 14]와 같이 1층 탑신부의 하단에 위치하고 기울기가 커질수록 처짐이 발생하는 쪽으로 하중이 집중되는 것을 알 수 있다.

표 3. 현 상태 대비 기울기에 따른 최대처짐량과 최대발생응력의 증가율

변위 \ 기울기	최대처짐량(mm)		최대발생응력(MPa)	
	증가량	증가율(%)	증가량	증가율(%)
1.43°	0.0006	3.7	-0.016	-5.35
3.43°	0.0039	24.07	0.044	14.72
5.43°	0.008	49.38	0.105	35.12

F.E.M 해석을 통해 수행된 결과들인 기울어진 정도에 따라 진전사지 삼층석탑의 최대처짐량 및 최대발생응력의 데이터를 이용하여 추세선을 나타낼 수 있다. [그림 15]는 진전사지 삼층석탑의 기울기에 대한 최대 처짐량 및 최대발생응력 증가율에 대한 추세선을 나타내고 있다.

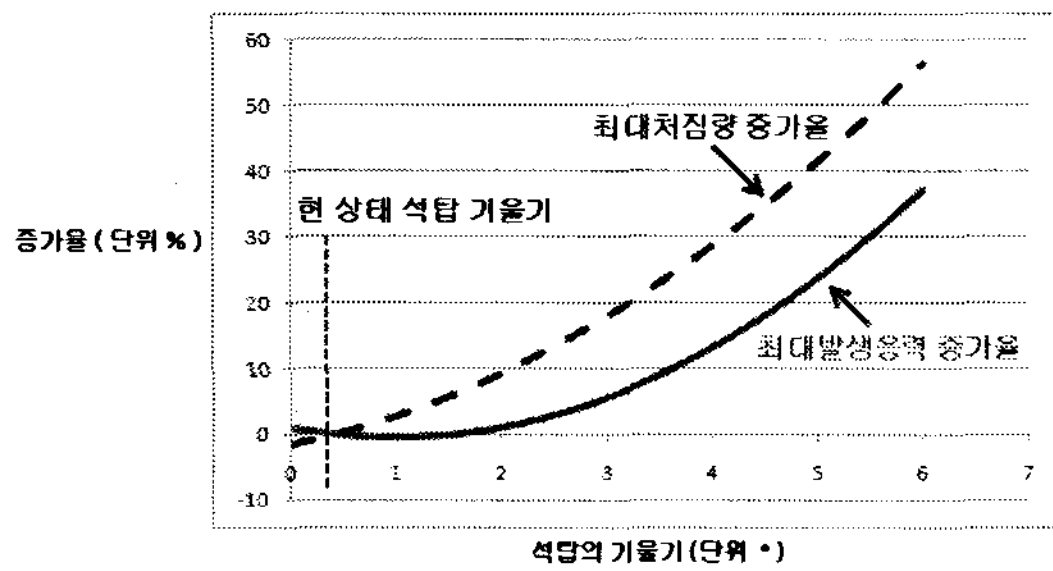


그림 15. 기울기에 따른 최대처짐량과 최대발생응력의 증가율

[그림 15]에서 보이는 진전사지 삼층석탑의 기울기에 대한 최대처짐량 증가율의 추세선을 방정식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_1 = 1.059x_1^2 + 3.308x_1 - 1.618 \quad (1)$$

방정식 (1)에서 y_1 은 최대처짐량 증가율(%)을, x_1 은 석탑의 기울기(°)를 나타낸다.

석탑 기울기에 대한 최대발생응력 증가율은 방정식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_2 = 1.498x_1^2 - 2.932x_1 + 0.984 \quad (2)$$

방정식(2)에서 y_2 은 최대발생응력 증가율(%)을, x_1 은 석탑의 기울기(°)를 나타낸다.

위의 두 가지 방정식들을 이용하면 진전사지 삼층석탑의 어떤 기울기에 대해 현 상태 대비 최대처짐량 및 최대 발생응력측면에서 몇 % 악화되었는지를 예측할 수 있다.

본 논문에서는 지지지반을 변형이 발생하지 않는 강체로 가정하여 해석하였다. 보다 정확히 탑의 안전성

을 검토하기 위해서는 석탑을 지지하고 있는 지반을 탄성지반의 형태로 모델링하여 해석할 필요가 있다.

III. 결론

본 논문에서는 진전사지 삼층석탑에 대한 안전진단을 위해 유한요소법을 이용한 전산해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 진전사지 삼층석탑의 부피는 $10.91m^3$ 이고, 무게는 약 $27520kgf(2.697 \times 10^5N)$ 이고, 현 상태의 석탑의 기울기는 0.43° 이다.

둘째, 기울기 변화에 따른 석탑의 최대처짐량 부위와 최대발생응력 부위는 각각 노반부에서 처짐이 생기는 쪽의 외곽 부분과 1층의 탑신과 기단부분이 맞닿는 곳이고, 현 상태 대비 최대처짐량 및 최대발생응력의 증가율을 예측할 수 있는 관계식들을 얻을 수 있다. 획득한 관계식들을 이용하여 기울기에 따른 최대처짐량과 최대발생응력 측면에서 현 상태 대비 탑의 악화율을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 탑의 기울기변화에 따라 처짐량 및 내부발생응력의 변화를 고찰하였다. 탑이 위치해 있는 지반의 불안정성, 다시 말해서 지반 아래로 지하수가 흐를 때 지반의 무너짐이나 탑 자중에 의해 탑이 점진적으로 기울어지는 경우, 본 방정식들을 적용하여 처짐량 및 내부발생응력 측면에서 탑의 안전성을 검토 및 예측하는데 유용하게 쓰일 수 있다.

참고문헌

- [1] 정밀안전진단보고서 불국사 석가탑, (주)고려구조ENG, 2001.
- [2] 정밀안전진단보고서 감은사지 삼층석탑, (주)고려구조ENG, 2001.
- [3] 이동남, 민정식, 정주호, “쇄석을 이용한 세립 골재 개발 연구, 한국자원연구소”, pp.128-129, 1995.
- [4] 서만천, 석조문화재의 비파괴진단분석을 통한 보

- 존기술연구, 과학기술부, p.12, 2005.
- [5] <http://www.encyber.com>
- [6] <http://www.cha.go.kr>
- [7] 3D 실현과 고증을 기반으로 한 건조물 문화재에 관한 연구, 경원대학교 문화콘텐츠기술 연구소, pp.45-61, 2008.
- [8] 최석원, “충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책, 과학기술부”, pp.72-73, 2001.
- [9] 정밀안전진단보고서 불국사 다보탑, (주)고려구조ENG, 2001.
- [10] Altair HyperWorks manual, Altair Engineering, 2007.

저자 소개

김 균 호(Kyun-Ho Kim)

준회원



- 2007년 2월 : 경원대학교 기계공학과(공학사)
 - 2007년 3월~현재 : 경원대학교 기계공학과 석사과정
- <관심분야> : 전산구조해석, 콘텐츠응용

정 재 응(Jaeung Chung)

정회원



- 2000년 12월 : 미국 미시간대 항공공학(박사)
 - 현재 : 경원대학교 기계자동차공학과 조교수
- <관심분야> : 전산구조해석, 복합재료, 콘텐츠응용