

## 개별요소법을 이용한 미륵사지석탑 구조안정성 평가

김현우, 윤정석, 전석원 (서울대학교 지구환경시스템공학부)

### 1. 서론

전라북도 익산시 미륵사지석탑은 현존하는 우리나라 최고(最古) 최대(最大)의 석탑으로서 목탑에서 석탑으로 이행되는 과정을 보여주는 중요문화재로의 역사적, 건축사적 가치가 높다. 그러나 미륵사지석탑은 1915년 이전에 많은 부분이 붕괴되어 일본인들이 석탑의 붕괴된 부분을 콘크리트와 석재로 응급 보수한 상태로 남아 있었으며, 1998년 구조안전진단결과 추가 붕괴의 위험성이 제기되어 붕괴원인조사 및 복원을 목적으로 2001년 해체보수 작업에 착수, 현재까지 진행중이다. 이처럼 붕괴이력이 있는 석탑의 복원을 위해서는 심미적 관점에서의 건축사 연구뿐만 아니라 시공과정과 재구성시 구조물의 안정성에 대한 구조적 검토가 필요하다.

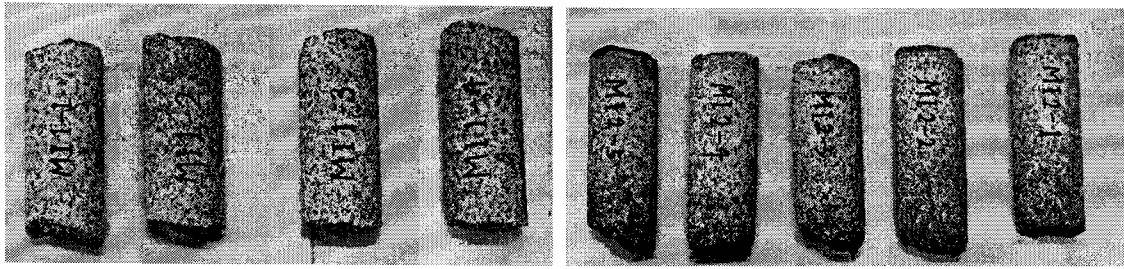
이러한 검토의 일환으로 본 연구에서는 현재 구성중인 복원안 중 1개안에 대해 석탑의 내부를 석재(적심석)로 채운 경우와 비워둔 경우를 가정하고 3차원 개별요소법 프로그램인 3DEC으로 모사하여 전산해석을 수행하였다. 일부 석재에서 시료를 채취하고 암석시험을 수행하여 재료 특성을 파악하였으며, 이를 근거로 석탑 축조시 자중으로 인해 발생하는 응력에 대해 구조안정성을 검토하였다. 석재의 실제 접촉면이 작은 점을 고려하여 응력의 집중 여부를 확인하였으며, 풍화에 따른 석재 및 접촉면의 열화가 안정성에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 석재의 일부가 탈락한 경우 전체 석탑의 거동 변화를 확인하였다.

### 2. 석탑의 재료특성 시험

가능한 한 실제에 가까운 석탑의 모델링 및 해석을 구현하기 위해서는 석탑의 재료특성을 정확히 파악하여 반영하는 과정이 필수적이다. 석재의 물리적 특성을 파악하기 위하여 해체된 석재 가운데 일부 적심석에서 시료를 채취하고 일축 및 삼축, 간접인장시험을 수행하였으며, 기존의 석탑 재료특성에 관한 연구결과와 비교하였다.

#### 2.1 시험결과

그림 1은 석재에서 채취한 일부 암석 코어의 시험전 사진이며 특히 (b)의 경우 석재 표층부에서 풍화가 진행된 것을 육안으로 확인할 수 있다.



(a) 적심석(MI1)

(b) 적심석(MI2)

그림 1. 적심석 암석 시편

실내시험 수행결과 석재의 재료특성 값은 표 1과 같다.

표 1. 미륵사지석탑 재료특성

시료	비중	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	내부 마찰각 (°)	P파속도 (m/s)	S파속도 (m/s)
MI1	2.51	39.0	7.5	0.32	7	57	1504	838
MI2	2.52	44.4	9.4	0.34	12	58	1445	718
MI3	2.56	85.0	19.8	0.31	-	-	1770	1140
MI4	2.58	74.0	17.1	0.30	-	-	1510	1000
MI5	2.55	62.0	10.7	0.28	-	-	2340	1330
MI6	2.51	54.0	15.8	0.33	-	-	2310	1350

## 2.2 기존 석탑 재료특성 비교

서만철 등(2001, 2002)은 불국사 삼층석탑 및 다보탑의 구조 안전 진단을 위하여 비파괴 조사를 수행하였으며 측정된 초음파속도를 이용하여 석재의 압축강도를 추정하였다. 문화재의 특성상 두 석탑의 압축강도는 간접적인 방법으로 추정되었으나 표 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 미륵사지석탑과 동일한 암종으로 축조시기가 100여 년 차이로 유사하며 다수의 지점에서 측정이 수행(삼층석탑의 경우 44 개 부재에서 456 지점, 다보탑의 경우 255 개 부재에서 641 지점)된 점을 고려할 때 비교대상으로 적절하다고 판단된다.

본 연구의 시험결과는 두 석탑의 압축강도 분포 범위에 포함되며 최소강도값이 두 석탑의 평균 압축강도에 근접해 있음을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 일반적으로 실내시험에서 사용하는 암석 시료의 상태가 거의 무결암에 가까워 현장 측정에 비해 강도가 비교적 크게 나오는 측면에서 이해될 수 있다. 한편 최근 급증하고 있는 60층 이상의 초고층 구조물에 사용되는 콘크리트의 압축강도가 대략 45~50 MPa 수준인 점을 감안한다면 시험결과로부터 강도 측면에서 미륵사지석탑은 안정하다고 예상할 수 있으며, 삼층석탑 및 다보탑에

관한 연구에서도 석재의 작은 강도로 인한 파괴 가능성을 매우 낮게 판단하였다.

표 2. 삼층석탑 및 다보탑의 조사결과 비교

항 목	불국사 삼층석탑	불국사 다보탑	미륵사지석탑
암 종	화강암	화강암	화강암
축조 시기	751 년	751 년	600~642 년 사이
압축강도*	평균 46.3 MPa (13.4~84.4 MPa)	평균 39.6 MPa (9.3~131.4 MPa)	39.0~85.0 MPa

\*) 화강암에 대한 초음파속도와 일축압축강도와의 관계로부터 구함  
 $C_0 = 66.039 \times \exp(0.000578598 \times V_p)$  (단위는 각각  $\text{kgf/cm}^2$ ,  $\text{m/sec}$ )

### 3. 구조안정성 평가

#### 3.1 해석모델

미륵사지석탑과 같은 블록식 구조물 해석은 개별요소법에 기반한 3DEC 프로그램을 이용함으로써 석재 사이의 미끄러짐, 벌어짐, 석재의 변위 및 회전, 새로운 접촉면 생성 등을 적절히 모사할 수 있으며 보다 실제에 가까운 구조해석 및 안정성 평가가 가능하다. 오랜된 석조식 교량 및 그리스 파르테논 신전과 같은 석조 건축물의 안정성 검토에 적용된 사례가 있으며, 선행된 미륵사지석탑의 붕괴원인 조사 연구도 3DEC을 사용하여 수행되었다.

석탑의 구체적인 복원안은 현재 계획 중에 있으므로 해석모델은 그림 2와 같이 복원된 동탑을 기초로 하여 복원 계획 층수인 6층까지 구현하였으며, 적심석의 역할을 파악할 수 있도록 그림 3과 같이 전 층을 비워둔 경우와 석재로 채운 경우로 나누었다.

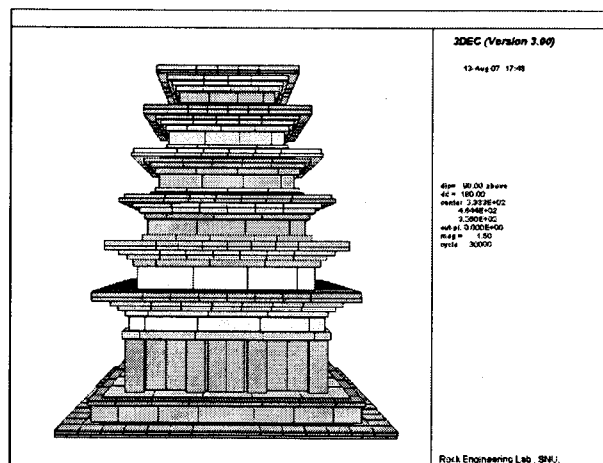
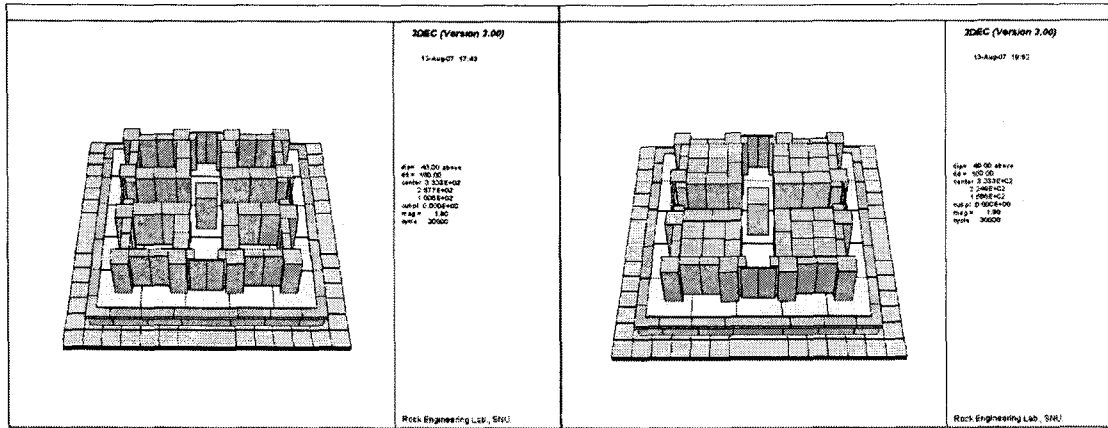


그림 2. 해석모델 전면부



(a) 적심석을 채우지 않은 경우

(b) 적심석을 채운 경우

그림 3. 해석모델 1층 내부

석재의 구성모델은 암석 및 콘크리트, 흙 등에 가장 널리 적용되는 모어-쿨롱 소성모델 (Mohr-Coulomb plasticity model)이며, 재료특성은 안전측 해석이 되도록 적심석에 대한 암석시험결과 중 최소값을 택하였다. 불연속면에 해당하는 석재 접촉면 모델은 절리, 단층과 같은 일반적인 암석의 불연속면 모사에 사용되는 면접촉 쿨롱 슬립 모델(Coulomb-slip model)을 적용하였으며, 적용 물성은 국립문화재연구소(2005)의 시험결과를 참조하였다.

표 3. 석재의 재료특성

적용모델	단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	마찰각 (°)
Mohr-Coulomb model	2.51	7.5	0.32	7	57

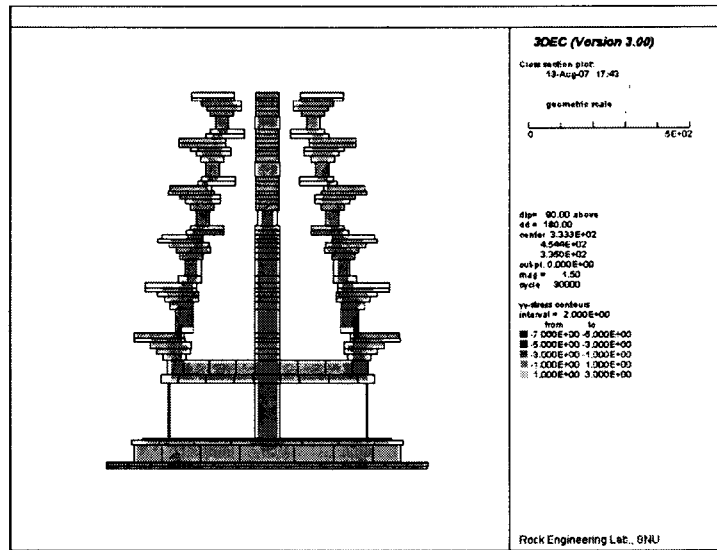
표 4. 석재 접촉면의 재료특성

적용모델	점착력 (MPa)	마찰각 (°)	수직강성 (GPa)	전단강성 (GPa)	비고
Coulomb-slip model	0.03	28.3	4.96	5.91	tension 없음

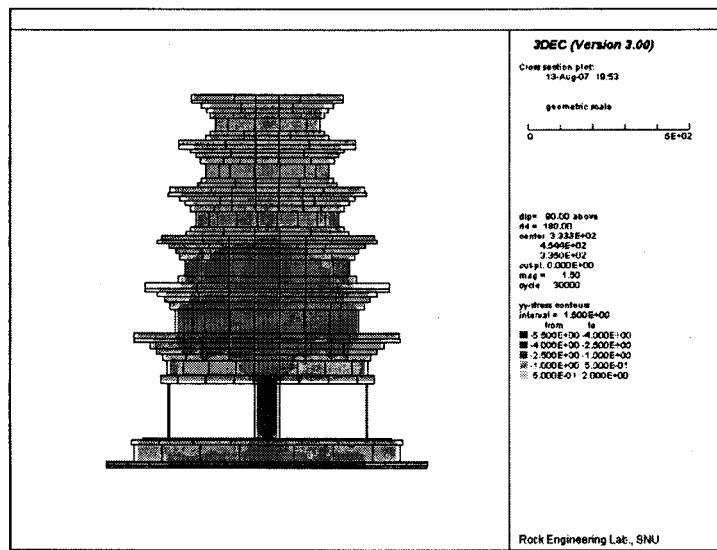
### 3.2 자중으로 발생한 응력 검토

전체적인 수직응력 분포를 그림 4와 같이 모델의 중앙부 단면(1층의 빈 공간은 십자통로에 해당함)을 통해 확인하였다. 적심석을 채우지 않은 경우 주로 중앙에 위치한 심주석과 각 층의 탐신을 따라 아치형태를 이루며 상대적으로 큰 수직응력이 분포하였고, 1층과 2층

이 만나는 지점에서 큰 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 반면 적심석으로 채운 경우 심 주석에 수직응력이 많이 발생하는 점은 동일하나 전 층에 걸쳐 응력이 고르게 분포하고 있음도 알 수 있다. 적심석을 채우지 않은 경우 최대수직응력이 발생한 부분은 1층 탑신부 아래층으로 크기가 1.110 MPa이고 채운 경우에도 발생한 층은 동일하나 0.978 MPa이다. 시험 결과 적심석의 압축강도가 최소 39.0 MPa인 점을 감안한다면 강도 측면에서는 안정적인 수준이라고 판단되며, 해석결과 파괴영역은 나타나지 않았다. 축조시 발생한 변위를 살펴봐도 최대수직변위가 채우지 않은 경우 0.335 mm, 채운 경우 0.234 mm로 매우 미세하였다. 두 경우 모두 자중이 작용하여 발생하는 수직응력과 변위는 안전한 수준이며 상대적으로는 적심석을 채운 경우가 구조적으로 더 안정하다고 할 수 있다.



(a) 적심석을 채우지 않은 경우



(b) 적심석을 채운 경우

그림 4. 수직응력 분포 (석탑의 중앙단면)

좀 더 자세히 살펴보기 위해 각 층별로 최대수직응력을 비교한 결과를 그림 5 및 표 5에 제시하였다. 1층 하부와 최상층인 6층을 제외하고는 전반적으로 적심석을 채운 경우 최대수직응력이 작게 발생하였다. 2~5층의 경우 적심석으로 채워져 하중이 고르게 분포함으로써 최대수직응력이 30~50 % 이상 감소하였고 1층의 경우에도 약 12 % 감소하였다. 적심석을 채우는 경우 전체 석재의 무게가 크게 증가했다는 점을 고려한다면 이러한 수직응력의 감소 비율은 더욱 크다고 할 수 있다. 또한 2층 이후부터는 적심석을 채운 경우 최대수직응력이 층에 상관없이 큰 차이를 보이지 않고 안정적으로 발생하는 반면, 채우지 않은 경우 편차가 있음을 확인할 수 있다.

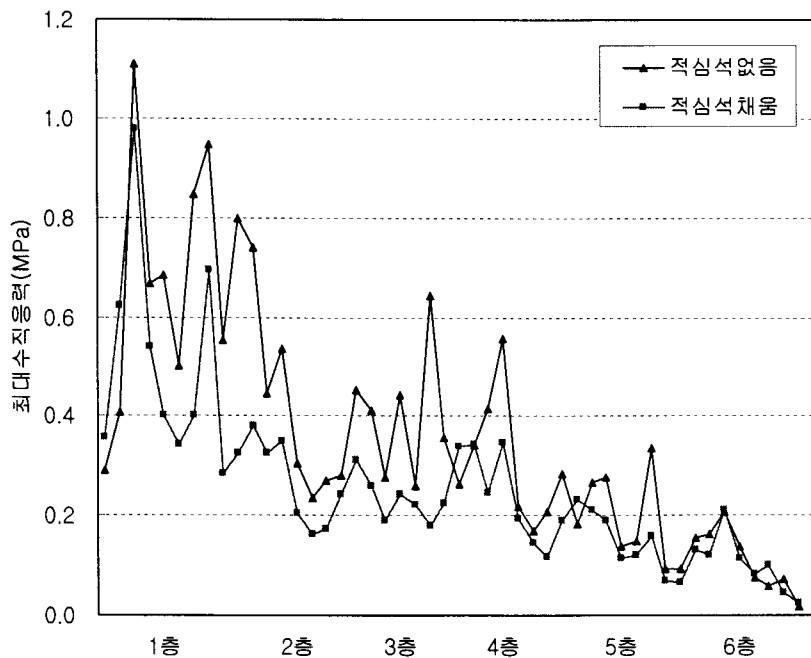


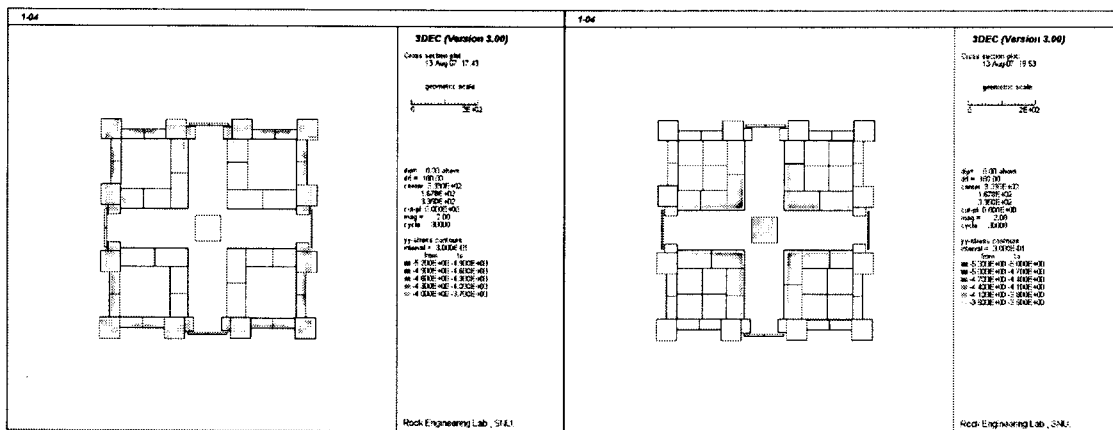
그림 5. 적심석 유무에 따른 최대수직응력 비교

표 5. 적심석 유무에 따른 각 층별 최대수직응력 비교

구 분	최대수직응력 (MPa)		감소비율 (%)
	적심석 채우지 않음	적심석 채움	
1 층	1.110	0.978	11.9
2 층	0.536	0.348	35.0
3 층	0.643	0.310	51.8
4 층	0.556	0.345	38.0
5 층	0.336	0.231	31.3
6 층	0.209	0.212	-1.6

3DEC을 이용한 구조해석은 석재 사이 접촉면이 완전히 밀착되어 있는 것으로 가정하지만 실제 암석 간 접촉면적은 각 경우마다 다른 값을 나타내어 암종이나 형태에 따라 접촉면적 범위를 명확히 제시하는 것은 불가능하다. 기존 연구 가운데 136 개 시료에 대한 조사 결과 접촉면적을 약 0.02~6.45 % 정도로 추정된 사례가 있으며, 석탑과 같이 석재로 구조물을 축조하는 경우 이처럼 접촉면적이 협소하다면 응력집중이 일어나 전체적인 파괴에 이르는 않더라도 석재 표면에서 부분적인 파괴를 유발할 수 있다.

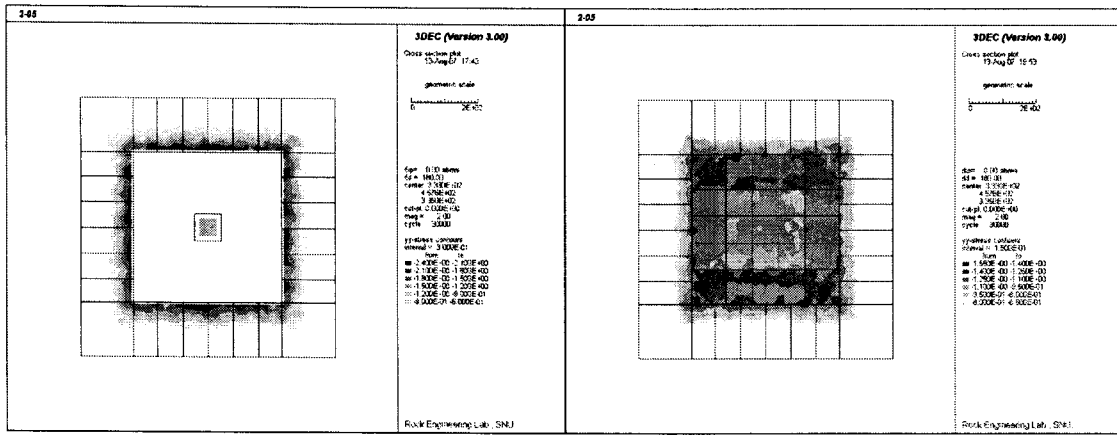
접촉면적을 1 %로 가정한 경우 적심석을 채우지 않았다면 1층의 각 단 접촉면마다 작은 영역에서 부분적으로 파괴가능성이 나타났으며, 1층의 십자통로 쪽보다 치장석에 해당하는 바깥쪽 석재에 그림 6 (a)와 같이 응력이 집중되었다. 적심석을 채운 경우 1층의 탑신부 및 그 하부의 매우 작은 영역에서 파괴 가능성이 나타났으며 십자통로의 외부보다는 내부에 주로 발생하였다. 석재의 접촉면이 매우 거칠고 굴곡이 심해 접촉면적이 0.2 %로 매우 작은 경우를 가정한다면 적심석 유무에 상관없이 최상층인 6층을 제외한 매 층의 각 단 접촉면마다 파괴가능성이 있는 영역이 존재하며, 적심석이 없는 경우 2층 옥개석에 해당하는 그림 7 (a)와 같이 심주석과 치장석의 안쪽 영역에서 발생하였다. 반면 적심석을 채운 경우 적심석의 전체 영역과 치장석 안쪽에 파괴가능성이 있다. 이처럼 석재의 특성상 접촉면적이 불규칙하고 협소하여 응력집중이 유발되고 이로 인해 부분적인 파괴가 일어나는 것을 방지하기 위해서는 석재 평면의 평평도를 최대한 유지하고 필요하다면 접촉면을 미세한 입자나 점착력이 있는 물질로 채워 면적을 늘려야 한다. 상기 해석결과와 같이 적심석을 채우고 1 % 이상의 면적이 접촉할 수 있도록 축조하여도 접촉면에서의 파괴가능성을 매우 작은 영역으로 한정할 수 있다.



(a) 적심석을 채우지 않은 경우

(b) 적심석을 채운 경우

그림 6. 응력집중 가능성이 있는 영역 (접촉면적 1 % 가정)



(a) 적심석을 채우지 않은 경우

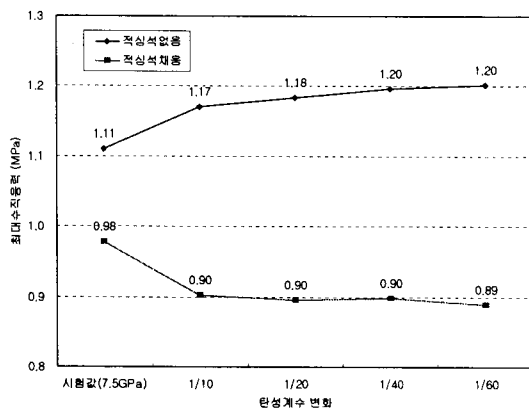
(b) 적심석을 채운 경우

그림 7. 응력집중 가능성이 있는 영역 (접촉면적 0.2 % 가정)

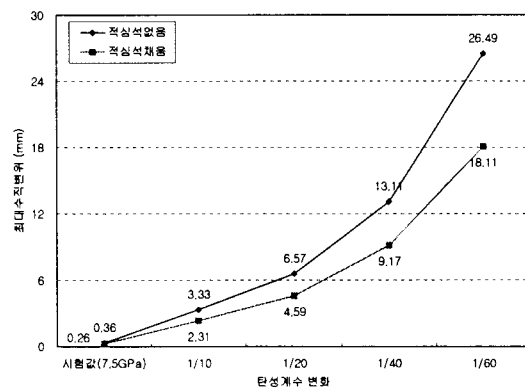
### 3.3 석재 및 접촉면의 열화에 따른 거동 변화

석재 관련 물성 중에서 단위중량은 동일 압중에 대해 변화가 거의 없으며 점착력과 마찰각은 석재의 파괴와 관련이 있다. 본 연구에서는 석재의 거동에 영향을 미치는 탄성계수와 포아송비가 오랜 시간 풍화에 의해 변화하는 경우 구조적 안정성에 어떤 영향을 미치는지 파악해 보고자 하였다. 현재의 석재 및 접촉면 물성 적용시 구조적으로 안정하므로 탄성계수가 7.5 GPa, 포아송비 0.32인 경우를 기준으로 탄성계수는 1/10~1/60배(0.125~0.75 GPa), 포아송비는 0.5~0.9배(0.16~0.29)로 각각 변화시켜 수직응력에 미치는 영향을 파악하였다.

그림 8에서 확인할 수 있듯 탄성계수의 감소는 수직응력보다 변위에 더 큰 영향을 주어 석재의 열화 정도가 증가할수록 두 경우 모두 최대수직변위도 비례적으로 증가하였으며 적심석으로 채웠을 때 상대적으로 변위가 작게 발생하였다. 적심석을 채우지 않은 경우 탄성계수의 감소는 최대수직응력의 증가를 유발하였으나 적심석을 채운 경우 오히려 10 % 정도 최대수직응력이 감소하며 보다 안정적인 상태를 유지하였다.



(a) 최대수직응력

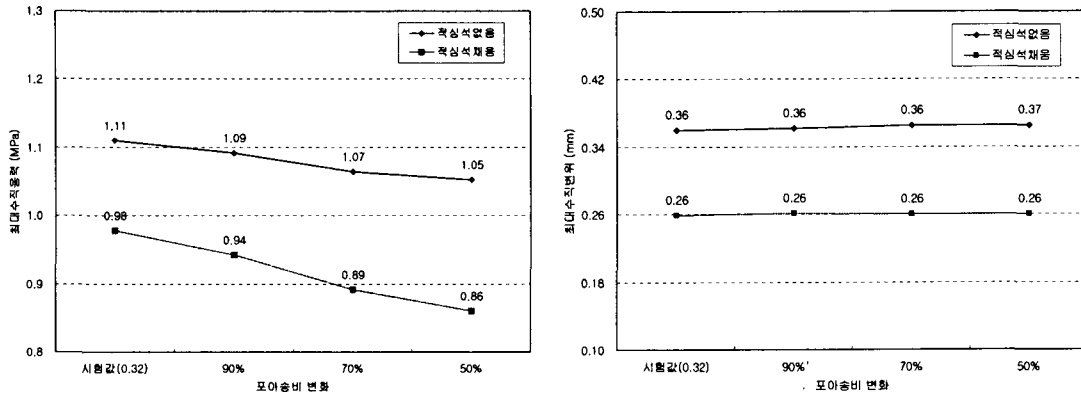


(b) 최대수직변위

그림 8. 탄성계수 감소에 따른 응력 및 변위 변화



포아송비의 변화는 그림 9와 같이 변위에는 거의 영향을 미치지 않으며 수직응력의 경우 5~12 % 정도의 감소를 유발하였다.



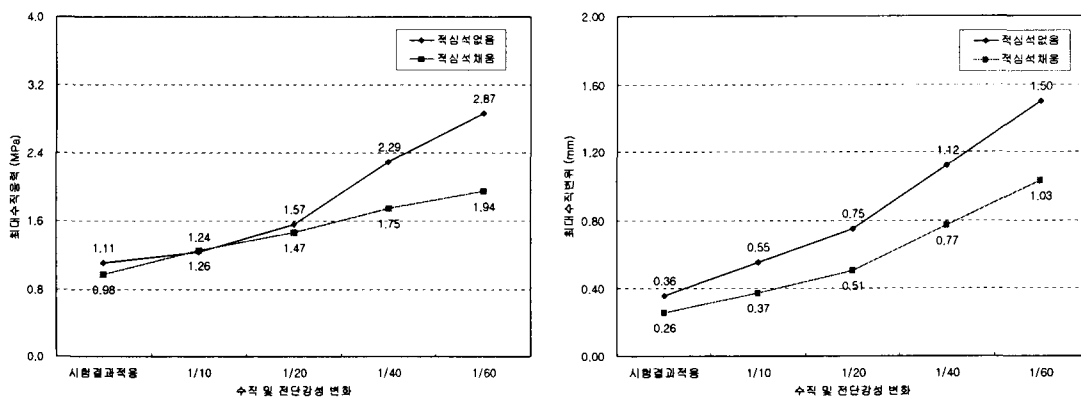
(a) 최대수직응력

(b) 최대수직변위

그림 9. 포아송비 감소에 따른 응력 및 변위 변화

석재의 접촉면은 직접 대기에 노출되어 풍화가 진행됨에 따라 석재 자체보다 더 빨리 열화가 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 불연속면의 수직 및 전단강성, 점착력, 마찰각이 감소할 때 어떤 거동을 보이는지 검토하였다.

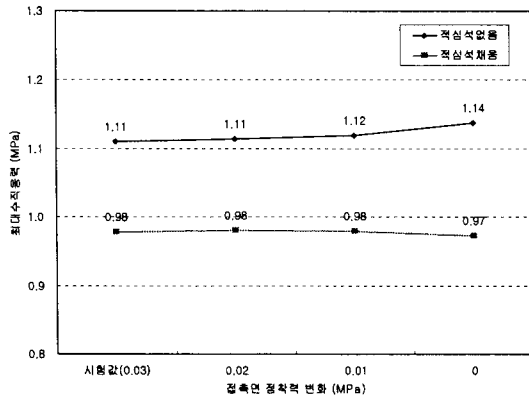
해석결과 두 경우 모두 수직 및 전단강성의 감소에 따라 최대수직응력은 증가하여 1/60 감소를 가정하였을 때 적심석을 채우지 않은 경우 최대 159 %의 응력이 증가하였으며 채운 경우에도 98 %의 응력 증가가 나타났다. 최대수직변위 역시 강성 감소에 따라 더 많이 발생하였다. 반면 점착력과 마찰각의 변화는 그림 11과 같이 응력에 큰 영향을 미치지 않았으며 변위도 거의 일정한 값을 유지하였다. 석재와 접촉면의 재료특성 변화가 미치는 영향을 직접적으로 비교하기는 어려우나 같은 비율로 감소시 석재 자체의 열화로 인해 발생하는 구조적 변화보다는 석재 간 접촉면이 풍화되어 약해질 때 발생하는 변화가 크므로 석탑의 구조안정성은 석재 재료특성보다는 접촉면 물성이 더 지배적이라고 할 수 있다.



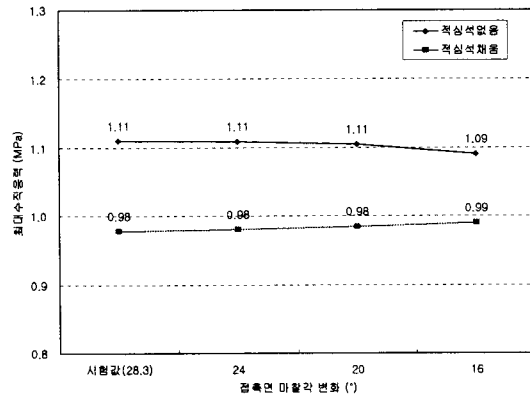
(a) 최대수직응력

(b) 최대수직변위

그림 10. 수직 및 전단강성 감소에 따른 응력 및 변위 변화



(a) 점착력 감소

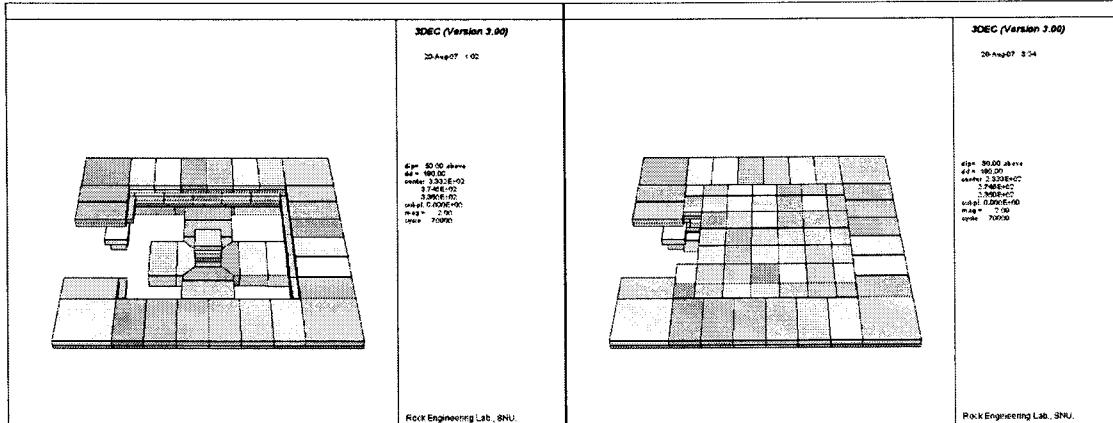


(b) 마찰각 감소

그림 11. 접촉면 점착력 및 마찰각 감소에 따른 응력 변화

### 3.4 부분적 석재 탈락 영향

석재의 파괴 또는 미끄러짐으로 석탑의 일부 영역이 부분적으로 탈락한 경우 구조안정성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해서 그림 12와 같이 응력이 비교적 집중되는 1층 천장부의 좌측 일부를 제거한 후 전체 구조물의 안정성을 검토하였다.



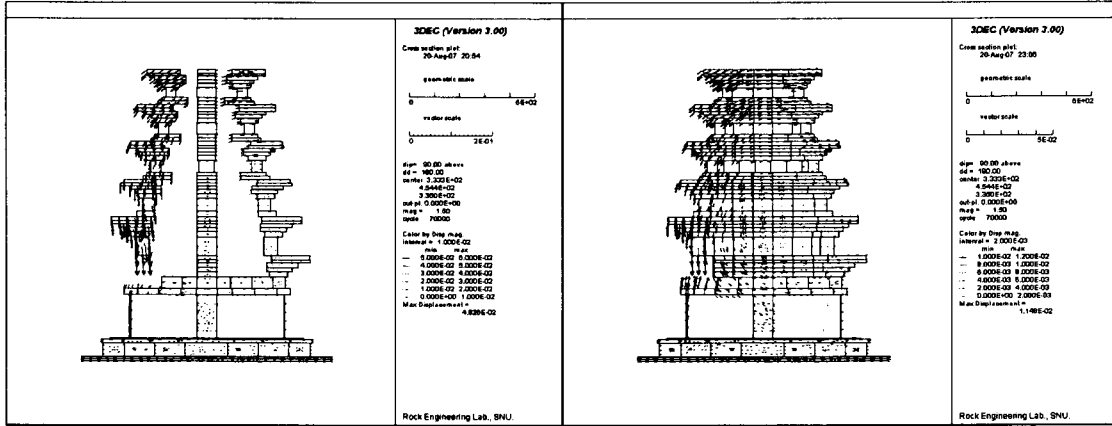
(a) 적심석을 채우지 않은 경우

(b) 적심석을 채운 경우

그림 12. 일부 구조물이 탈락한 모델 (1층 6단~11단)

전체 구조물이 축조되고 구조적으로 안정한 상태에서 일부 석재의 탈락으로 인해 발생한 변위를 확인한 결과 적심석을 채우지 않은 경우 전체 석재 중 좌측에서 최대 0.67mm 발생하였으며 그림 13 (a)의 중심 단면에서는 최대 0.48mm 하향으로 발생하였다. 적심석을 채운 경우에는 전체 석재에서 최대 0.15mm, 중심 단면을 기준으로 할 때 최대 0.11mm 발생하였다. 두 경우 모두 변위가 매우 미세하게 발생하였으며 이로 인한 응력분포의 변화는 크지 않을 것으로 판단된다. 이러한 현상은 구조물이 축조되면서 석재가 잘 맞물리고 힘의 분포

가 아치를 이루어 매우 안정한 상태에 도달함에 따라 석탑의 치장석과 같은 표층부의 부분적인 손실이 전체 구조의 안정성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다. 상대적으로는 적심석을 채운 경우가 이미 언급된 바와 같이 석재 탈락에도 더 안정적으로 반응하였다.



(a) 적심석을 채우지 않은 경우

(b) 적심석을 채운 경우

그림 13. 구조물 탈락으로 발생한 변위 분포

#### 4. 결론

본 연구에서는 붕괴이력이 있는 미륵사지석탑을 장래 안정적으로 복원할 수 있도록 석재에 대해 실내시험을 수행하고 그 결과에 기초하여 구조안정성을 평가하였다. 석탑을 구성하고 있던 적심석의 암석시험 결과 석재 표면의 풍화를 확인하였고 암석강도 범위가 39~85 MPa로 축조시기가 비슷한 불국사 삼층석탑, 다보탑의 비파괴조사와 비교하여 유사함을 확인하였다. 자중으로 발생한 층별 최대수직응력은 적심석을 채운 경우 최대 52 %까지 감소하였으며 층에 상관없이 안정적으로 발생하였다. 접촉면적 1 % 및 0.2 %을 가정하였을 때 적심석 유무에 따른 응력집중의 다른 양상을 확인하였다. 석재의 풍화로 인한 물성 변화시 포아송비보다 탄성계수의 영향이 더 크며 탄성계수 감소는 응력보다는 변위증가를 더 유발하였다. 접촉면의 물성 변화에서 점착력과 마찰각의 영향은 상대적으로 작으며 수직 및 전단강성이 기준값의 1/60까지 감소할 때 최대수직응력은 최대 159 %까지 증가하였다. 석탑의 구조안정성은 석재 재료특성보다는 접촉면 물성이 더 지배적임을 확인하였다. 안정적인 상태의 석탑에서 부분적으로 일부 석재가 탈락한 경우 전체 구조의 안정성에는 크게 영향을 미치지 않았으며, 자중, 재료의 열화, 석재 탈락 등 모든 검토결과에서 적심석을 채운 경우가 비워둔 경우보다 상대적으로 안정함을 파악하였다. 향후 연구사항으로는 내진에 대한 구조안정성 검토가 요구되며 해석상의 가정 및 해석기법의 한계로 고려되지 못한 변수가 있을 수 있으므로 모형실험 및 기존 사례를 통해 보완할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국립문화재연구소가 시행하는 '미륵사지석탑 정비계획을 위한 구조안정성 평가 연구' 과제에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 국립문화재연구소, 2005, 구조해석을 통한 미륵사지석탑 붕괴원인 조사연구 보고서, pp. 1~2.
2. 김도수, 길배수, 최세진, 이성연, 2007, 고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 균열 저감제의 영향에 관한 실험적 연구, 레미콘, 91, p. 10.
3. 서만철, 송인선, 최희수, 2001, 암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단, 지구물리, 4, pp. 57~69.
4. 서만철, 송인선, 최희수, 2002, 초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조 안전 진단, 지구물리, 5, pp. 199~209.
5. Barton, N., Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, 10, p.47.
6. Psycharis, et al., 2003, Numerical study of the seismic behavior of a part of the Parthenon Pronaos, Earthquake Engng Struct. Dyn., 32, pp. 2063~2084.