

# 불국사 삼층석탑 해체수리와 9.12 경주지진 분석

김덕문\*

- I. 서론
- II. 역사적 배경
- III. 지진 안정성 평가
- IV. 해체수리 공법
- V. 9.12경주지진 현황 분석
- VI. 결론

## I. 서론

경주 불국사 삼층석탑은 신라 경덕왕 원년(742)에 창건되어 오늘날까지 그 전체적인 모습을 유지하고 있다. 국립문화재연구소에서는 2012년 10월부터 2014년 6월까지 20여 개월 동안 해체조사를 실시하였다. 이어서 2016년 7월 수리복원 공사가 완료되었다. 공사완료 직후 9월 12일 9.12경주지진이 발생하였다.

9.12경주지진은 국내 지진계측이 시작된 이래 가장 큰 규모로 기록되었다. 이에 지진재해에 대한 경계심이 고조되었으며 수많은 석탑 문화재에 대한 내진구조 대책을 논하게 되었다. 지진발생 직전에 해체 수리된 불국사 삼층석탑은 다행히도 9.12경주지진에 별 피해 없이 안전하게 유지되어 그 구조와 공법에 대해 새롭게 주목을 받게 되었다.

---

\* 국립문화재연구소

불국사 삼층석탑 해체 수리는 훼손 원인규명과 지진에 대한 사전 연구를 바탕으로 체계적으로 진행되었다. 불국사 삼층석탑은 지진진동 시험연구에서 내진 구조성능이 뛰어난 건물로 평가 확인되었다. 연구결과에 따라 해체수리는 구조원형 회복을 중요한 목표 가운데 하나로 설정하였다. 그 결과 전례 없는 규모 5.8 지진을 안전하게 견디어 냈으며 석탑 해체수리에서 역사적인 구조기술에 대한 이해와 구조원형 회복에 대한 중요성이 확인되었다. 해체 수리에 적용된 공법은 9.12경주지진 계측점검 내용과 함께 비교분석을 통해 결론으로 도출 정리하였다. 한편 이 논문은 그동안 양식계통 史에 치중된 석탑 역사연구에 대해 새로운 시각으로 구조 技術史의 측면에서 접근하였음에 의의를 두고 있다.

## II. 역사적 배경

불국사 삼층석탑 창건에 관한 기록은 『三國遺事』와 『新羅國東吐含山華嚴宗佛國寺事蹟』(이하 『불국사사적』)을 비롯해 1966년 해체수리 과정에서 발견된 고려시대 목서지편인 『佛國寺无垢淨光塔重修記』와 『佛國寺西石塔重修形止記』 등에 나타나 있다. 창건연대는 기록에 따라 차이가 있다. 一然이 저술한 『삼국유사』 권5 『大成孝二世父母』에는 ‘경덕왕 10년(751) 대성이 공사를 착공하여 혜공왕 대에 완성하였다고 나타나 있다.

한편 불국사 창건은 『佛國寺古今創記』에 ‘528년(법흥왕 15) 迎帝夫人(법흥왕 어머니)이 발원하여 574년(진흥왕 35)에 비로자나불과 아미타불을 주조 봉안하면서 중흥을 이루었다. 670년(문무왕 10)에는 무설전이 건축되었으며, 751년(경덕왕 10)에 金大城이 탑과 석교 등을 축조 중창하였다.’고 기술되어 있다. 『불국사사적』에는 ‘눌지왕(417~457년) 때 阿道和尚이 창건하였고 경덕왕 때 재상 김대성에 의하여 크게 3창되었다.’고 나타나 있다.

1046년에 저술되고 1708년에 改版된 『불국사사적』과 승려 東隱이 양란을 겪으며 찬술한 『불국사고금창기』는 역사에 대한 이해가 부족한 상태에서 옛 기록들을 모아 놓은 것으로 사실여부를 판단하기 어렵게 한다.<sup>1</sup> 다만 소규모로 존재하던 불국사가 경덕왕 때 재상 김대성에 의하여 크게 중창되었음을 알 수 있게 한다. 『삼국유사』 권5 『대성효이세부모』조에는 ‘경덕왕 10년 김대성이 전세 부모를 위한 석굴암과 현세 부모를 위한 불국사를 창건하였으며 공사를 착공하여 완공

1 오경후, 「17세기 불국사고금창기와 호남의 사찰사적지」, 『신라문화』 Vol. 19(2001), p. 149.

하지 못하고 사망하자, 국가에 의하여 완성을 보았으니 30여 년의 세월이 걸렸다.'고 기록되어 있다. 당시 불국사는 대웅전 25칸, 다보탑·석가탑·靑雲橋·白雲橋, 극락전 12칸, 無說殿 32칸, 毘盧殿 18칸 등 80여개 건물 약 2,000칸 규모로 이루어져 있었다고 전해진다.

불국사 삼층석탑 창건기록은 1966년 해체수리 과정에서 발견된 고려시대 묵서지편인 「불국사무구정광탑중수기」에 나타나 있다. 이 묵서지편은 불국사 창건이 경덕왕 즉위를 기념하기 위한 국가적 사업이었음을 암시하는 사실적 사료라고 볼 수 있다.<sup>2</sup> 그리고 '무구정광탑은 경덕왕 원년(742)에 조성하기 시작하여 혜공왕(765~780) 대에 완성되었다.'고 기록되어 있다.<sup>3</sup> 불국사 삼층석탑은 관련 사료들을 고찰해 보았을 때 불국사가 크게 중창된 경덕왕 원년(742)에 창건되었을 것으로 판단된다. 또한 사료마다 명칭을 달리하고 있지만, 오늘날 "석가탑"으로 널리 알려져 있다.

석가탑 출토 묵서지편에는 탑을 1024년부터 1038년까지 중수한 내용이 기록되어 있다. 「불국사무구정광탑중수기」에는 '1024년 훼손된 불국사 서석탑의 부재를 교체하기 위해 2월 17일 탑 해체를 시작하여 사리를 수습하고, 절석 파손된 부재를 다시 제작해서 쌓아올려 사리를 봉안하였다.'고 기록되어 있다. 「불국사무구정광탑중수형지기」에는 '1036년에 발생한 대지진으로 무너진 하불문과 행랑, 서석탑(석가탑)에 버팀목을 설치하였다. 그리고 1038년 석탑복구 작업과 함께 사리를 봉안하던 중에 재차 지진이 발생하여 彌勒三會棟梁을 결정하고 재물을 모아 중수를 준비하였다. 이에 하층 옥개석, 금당석을 해체하고 지대를 복원하였다.'고 석가탑 중수과정과 내용이 상세하게 기록되어 있다.<sup>4</sup>

1036년도 지진은 하불문과 행랑이 무너졌다는 기록으로 보아 그 규모를 짐작해 볼 수 있다. 목조건물은 비교적 지진에 잘 견디는 가구식 구조로 이루어져 있다. 목조 가구식 구조는 접합부가 지진진동에 효과적으로 대응할 수 있는 이음맞춤으로 이루어져 있다. 탄성이 좋은 목재 재질 특성 또한 지진진동에 뛰어난 내구성을 지니고 있다. 9.12경주지진(리히터 지진강도 5.8)으로 인한 목조건물 피해는 벽체균열이나 기와탈락 등 구조적 피해보다는 주로 마감부위에 재료적 손상으로 나타났다. 한편 목조건물인 하불문과 행랑이 무너진 1036년 지진은 대단히 큰 강진이었음을 짐작케 한다. 버팀목을 설치하게 되었다는 석가탑은 기울어졌거나 구조거동에 따른 변형이

2 亦\_王矣則位天寶元年壬午元成立(爲)白乎矣\_惠恭大王矣代良中沙口成立爲白教事是置在赤: 국립중앙박물관, 『불국사 석가탑 유물 2. 중수문서』 ((주)시티파트너, 2009), p.51.

3 국립중앙박물관, 위의 책, p. 51, 67.

4 국립중앙박물관·대한불교조계종, 『불국사 석가탑 유물 2. 중수문서』 (국립중앙박물관·대한불교조계종, 2009), pp. 108-118.

크게 발생하였을 것으로 보인다. 1036년도 지진에 대해 석가탑은 부재 이탈이나 부분붕괴 없이 전체적인 구조를 유지할 수 있었을 정도로 상당한 내진 구조성능을 지니고 있다고 평가된다.

1038년도 수리 이후 조선시대에 들어 석가탑은 수리기록이 거의 나타나지 않고 있다. 1916년도에 발간된 『조선고적도보』 사진에 보이는 석가탑은 상륜부에 보륜 이상을 제외하고 전체적인 모습이 온전하게 잘 남아 있다. 이러한 보존 상태는 1966년 도굴에 의한 피해 전까지 큰 변화 없이 유지되었다. 2010년 12월 기단갑석 절단에 따른 해체수리는 오랜 시간경과에 따른 구조결함 발생과 석재 내구성능 저하로 인한 물리적, 역사적 현상으로 볼 수 있다. 또한 1036년 地震擧動과 함께 보존이력을 검토해 보면 석가탑은 상당한 크기의 강진에 대해서도 안정적으로 유지될 수 있는 내진성능을 지니고 있다고 판단된다.

### Ⅲ. 지진 안정성 평가

석가탑이 위치한 경주지역에는 그동안 여러 차례 지진이 발생하였으며 그 피해 상황에 대한 기록이 『삼국사기』와 『고려사』 등에 나타나 있다. 석가탑이 창건(742년)된 직후 755년에는 ‘지진이 발생하여 望德寺 탑이 흔들렸다. 마주 서있는 두 탑은 높이가 13층인데, 갑자기 떨고 흔들리며 문이 열렸다 닫혔다 하면서 며칠 동안이나 쓸어질듯 하였다.’고 『삼국사기』에 기록되어 있다. 이어서 779년에도 지진이 발생하여 땅이 흔들리고 민가 여러 채가 부서져 100여 명이 사망한 기록도 남아 있다. 특히 1036년 지진피해 기록에는 석가탑이 기울어져서 버팀목을 설치하였다고 기술되어 있다. 이러한 석가탑 역사지진 기록은 공학적 평가와 지진거동 특성을 파악하기 위한 중요한 자료로 남아있다.

2011년 국립문화재연구소에서는 충남대학교 산학협력단과 함께 석가탑을 비롯해 침성대 모형을 제작하여 지진진동에 대한 동적원심모형시험을 실시하였다. 시험내용은 『서울지역 건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』 보고서에 수록하였으며 9.12경주 지진거동 계측조사 데



도 1 불국사 삼층석탑(朝鮮總督府, 『朝鮮古蹟圖譜』)

이터와 함께 문화재 지진대책 연구에 중요한 근거자료로 확보되었다.<sup>5</sup>

〈표 1〉 경주지역 지진피해 역사기록

(국립문화재연구소·충남대학교 산학협력단, 『서울지역건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』 2011.)

연도	지진	기록	출처
100년 12월	경주지진	·땅이 흔들려 민가가 무너지고 죽은 자가 있었다.	삼국사기
304년 10월	경주지진	·땅이 흔들려 민가가 무너지고 죽은 자가 있었다.	삼국사기
664년 9월	경주지진	·땅이 흔들리고 민가가 파손되었는데 남쪽이 더욱 심하였다.	삼국사기
755년	경주지진	·망덕사(望德寺) 탑이 흔들렸다. 마주 서있는 두 탑은 13층인데, 갑자기 흔들리면서 문이 열렸다 닫혔다 하였으며 며칠 동안 쓸어질듯 하였다.	삼국사기
779년	경주지진	·경주 땅이 흔들리고 민가가 파손되었으며 죽은 자가 100여명이 되었다.	삼국사기(한전전력연구원, 2000)
1036년 6월 21일	경주지진	·경주를 중심으로 한 대규모 지진으로 석가탑 붕괴 위험 직면 ·같은 해 8월 손상된 일부 건축물 수리	墨書紙片(국립중앙박물관, 2005)
1036년 7월 23일	전국지진	·개성, 경주, 상주, 광주, 강원도 연변부 등의 관내에 땅이 흔들려 흙담집과 여막집들이 무너졌으며, 경주는 심해서 3일 만에 야그쳤다.	고려사(한전전력연구원, 2000)

지진위험도 평가방법은 하부지반에 대한 고유의 지진응답해석에 기초하여 수행하였다. 지진응답해석 결과 깊이별 최대 지반가속도 및 지표면 최대가속도, 전단변형률, 전단응력 및 구조물 주기에 따른 응답스펙트럼 등을 도출하였다. 석가탑모형 지진진동 실험은 지반조사자료 및 지진에 대한 지반응답해석 결과에 따라 모형하부에 가진될 지진파이력을 작성하였다.

지진이 발생하였을 때 석가탑 하부에 작용하는 지진력을 결정하기 위해서는 지반조사가 필요하며 탄성과굴절법, 전기비저항법 등 다양한 지구물리학적 현장조사를 시행하여 자료를 확보하였다.<sup>6</sup> 불국사는 대체로 전면 대석축을 기점으로 대웅전 뒷마당까지 성토지반으로 구축되어 있다. 석가탑 하부 기초는 성토지반을 기단 외측까지 넓게 파낸 다음 큰 암석과 흙을 섞어 다져서 만든 온통기초로 이루어져 있다.

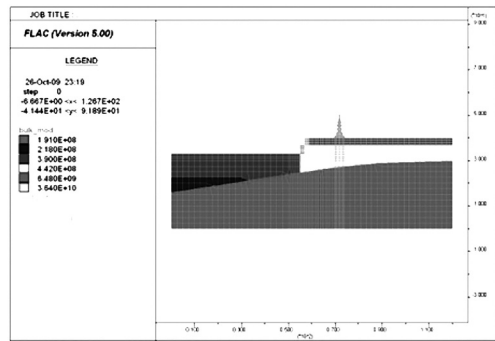
<sup>5</sup> 국립문화재연구소·충남대학교 산학협력단, 『서울지역 건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』(국립문화재연구소, 2011), pp.248-254.

<sup>6</sup> 국립문화재연구소·KAIST, 『서울지역건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』(국립문화재연구소, 2011), p.55.

석가탑 하부 지반은 지반응답해석 결과 붕괴방지 특등급 수준의 지진규모 再現週期<sup>7</sup> 2400년 지진에 대한 2차원해석에서 암반노두 최대가속도의 1.45배, 1차원해석에서 1.65배 가속도 증폭이 발생하였다. 또한 붕괴방지 1등급 수준 지진(재현주기) 1000년 지진에 대해서는 1차원, 2차원 해석 모두 1.74배 가속도 증폭이 발생하였다. 지반 고유주기는 0.13~0.15초(6.7~7.7Hz)로 계산되었다. 석가탑 모형은 원심모형시험을 위한 진동대 바스켓 크기와 예측되는 반응주파수대역과 제작 가능성을 고려한 1/15 크기로 황등산<sup>8</sup> 화강석으로 제작하였다. 동적원심모형시험(진동대시험)에서는 1/15 석탑모형에 하중특성과 상사비를 고려해 15배 증력가속도 15g 원심력을 수직으로 작동 실시였다.

시험 모델은 3가지 종류로 나누어 동적원심모형 진동시험을 진행하였다.<sup>9</sup> 모델1은 기단 내부 속채움을 자갈과 풍화토로 구성하였다. 모델2는 기단 속채움을 제거 하였다. 모델3은 부재와 부재 사이 접촉면적을 최소화하였다. 석가탑은 각각 별석으로 쌓여 있는 옥개석과 탑신석 접촉면에서 중앙부를 오목하게 파내어 외면 가장자리 30mm 정도만 맞닿도록 치석되어 있다. 이러한 치석 상태를 반영하여 모형에는 부재 접촉면에 샌드페이퍼를 띠로 부착하였다. 이 3가지 모델에 대한 지진거동 특성을 비교 평가하였다.

지표면에 가한 최대가속도 0.5g 수준에서 3개 석탑 모델 모두는 부재이탈이나 붕괴현상이 나타나지 않았다. 국내 내진설계기준에 명시된 암반입력 최대 지진 가속도 0.22g에 비해 지반가속도 증폭비가 1.45~1.74배인 석가탑은 붕괴방지 특등급

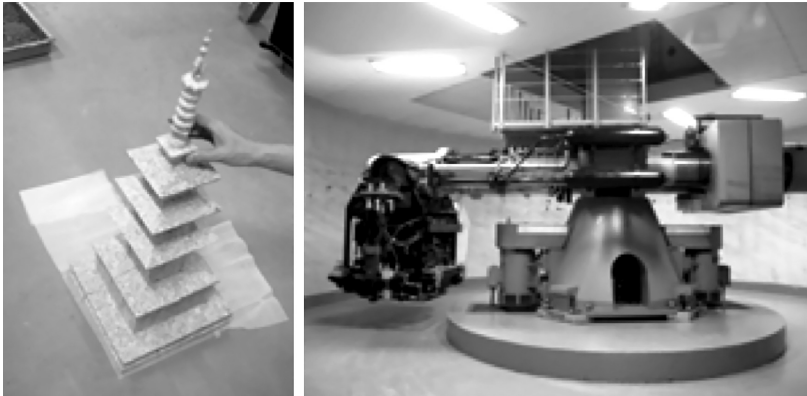


도 2 석가탑 하부 지반조사도(국립문화재연구소·충남대학교 산학협력단, 『서울지역건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』, 2011.)

7 再現週期: 일반 건축·건설에서 내진설계 기준으로 지진규모(강도)에 대해 역사지진을 적용하고 있으며 500년, 1000년, 2400년에 기간에 1회 발생할 정도 크기를 단위로 산정 적용하고 있다.

8 모형제작에 사용한 황등산 화강암은 샘플시편의 FFRC 시험 및 밀도시험을 통해 탄성과 속도, 탄성계수 및 밀도를 계산하였다. 석가탑에 사용된 화강암은 경주 남산 석재로 전단파속도가 2295m/s 정도로 산정되어 있다. 모형 석재 밀도와 강성은 실제 석가탑과 큰 오차가 없으므로 실제 지진거동을 모사에 신뢰도를 확보하였다.

9 원심모형시험: KAIST 지오센트리퓨지 센터에 도입되어 운영 중인 원심모형시험 시설을 이용하였다. Ng의 원심 가속도로 회전하는 중에 지진모사가 가능한 시설이다. 진동대 실험에 따른 모형의 변형을 고속으로 촬영하기 위하여 초당 1,000 프레임으로 촬영할 수 있는 초고속 카메라와 정적 실험에서 모형의 변형관측 및 상시 모니터링을 위한 범용 디지털 동영상 카메라 등이 설치되어 있다.



도 3 석가탑모형과 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 동적 원심모형시험시설(국립문화재연구소·충남대학교 산학협력단, 『서울지역건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』, 2011.)

수준의 재현주기 2400년/지진에 안전할 정도로 강성이 큰 내진구조로 건축되어 있다.

석가탑은 지진진동시험에서 고려시대에 지진으로 인하여 붕괴위험에 처했었던 기록으로 보아 상부 부재가 탈락되거나 흐트러질 가능성을 예상하였지만, 횡방향 동하중에 대하여 안정적이었다. 탑신석과 옥개석이 모두 1매석 통부재로 이루어져 있으며 전후좌우로 대칭을 이루는 석가탑은 무게중심이 1층 탑신부에 위치하는 매우 안정적인 구조로 이루어져 있다. 또한 창건 이래 그동안 지진 피해를 입었을 확률이 낮은 안정적인 구조체임으로 확인되었다. 실험결과를 통해 1036년의 역사지진 기록에 대한 정량적 재평가는 어려웠지만, 구조 자체적인 횡방향 동적 불안정으로 인해 생긴 현상이 아니었을 것으로 추정된다. 당시 석가탑 지진 피해 원인은 석탑 남쪽 지반의 변형 또는 기초부 부등침하, 기단갑석 파손, 적심유실 등으로 중심축 변형과 함께 대칭성이 결여된 상태에서 지진진동의해 반복적인 동적 수직하중에 의한 피로누적 피해현상으로 고찰되었다.

경주는 유적 분포 밀도가 매우 높은 역사도시이다. 경주지역은 빈번한 지진발생 역사기록이 남아 있으며 양산단층 영향권 내에 있다. 이를테면 지진발생 가능성이 높은 지역이라고 할 수 있다. 경주에는 불국사 삼층석탑을 비롯해 수많은 건축 문화재가 남아 있다. 각각의 문화재는 위치에 따른 지반조건과 구조형태를 달리하고 있다. 그런 까닭에 지진 위험도평가는 개별 문화재별로 접근 진행하였다.

지반응답해석은 현장시험 자료와 기존 지반조사 자료를 이용해 총 82개 문화재에 대해 수행하였다. 1차원 등가선형 해석을 모두 수행하였고, 불국사는 산악지형 입지를 고려해 2D 비선형 해석을 추가 수행하였다. 또한 삼층석탑은 수치해석도 함께 수행하여 그 결과를 비교하였다. 지반응답해석 결과 지표면 최대가속도 값을 이용하여 암반노두에 대한 지표면의 증폭비를 정

리하였다. 주요 문화재별로 암반노두 가속도에 대한 지표면 최대 증폭비는 경주 남산리 삼층석탑(최대1.92배), 경주 첨성대, 망덕사지 당간지주, 불국사 삼층석탑(2D해석결과), 경주박물관 내 고선사지 삼층석탑 등 5개 문화재 주변 지반에서 1.5배 이상의 지반증폭 예상 치로 나타났다. 반면 양동마을 관가정과 향단, 나원리 오층석탑, 경주 배리 석불입상, 분황사 석탑 등 5개 문화재는 지표면 증폭비 정도가 1.3배 이하에서 발생하여 지진에 대한 지반증폭 가능성이 낮게 나타났다. 지반 증폭 정도 및 응답스펙트럼 자료는 차후 구조해석 및 지반구조물 상호작용 등의 연구를 통해 구조물 및 지반의 이중증폭 또는 공진현상 연구 기초자료로 확보되었다.<sup>10</sup> 기반암깊이와 지반 고유주기, 지반증폭정도는 상호 연관성을 갖고 있으며 계림, 첨성대, 임해전지 인근 동부 사적지대, 망덕사지~남산리 삼층석탑의 남산 동쪽 평야지대에서 지진 위험도가 비교적 큰 것으로 평가되었다.

대표적인 예로 첨성대는 일반적인 건축물과 달리 독특한 구조와 형태로 건축되어 있으며 중심축이 기울어져 있는 상태에 처해 있다. 9.12경주지진 발생 당시에는 이목이 집중되었으며 수리여부에 대한 논란도 있었다. 첨성대는 지진 대응뿐만 아니라 지속적인 보존을 위해 보다 구체적인 공학적 검토와 논의가 필요하다. 더욱이 9.12경주지진 영향으로 중심축변형이 더욱 크게 진행된 構造舉動은 경계심을 내려놓을 수 없게 하며 심각한 우려 속에 안타까운 심정을 배제할 수 없다. 비록 논점이 흩어지지만 그동안 연구내용과 9.12경주지진 피해사항을 소개하고자 한다.

첨성대 지진 위험도평가를 위한 지반조사는 남과 북 2곳에서 시추를 수행하였고, 이 시추공에서 각각 다운휨탄성파시험 및 주변지반에 대한 표면파 시험을 수행하였다. 2개 시추공에 시료를 채취 시추 주상도를 확보하였다. 시료분석 결과 첨성대지반은 15~17m 깊이까지 모래 섞인 자갈 또는 자갈 섞인 실트질 모래로 다져진 층적층으로 이루어져 있다. 지지 기반암은 17m 깊이에 화강암이 풍화된 연암으로 형성되어 있다. 시추와 탄성파 주상도를 이용한 첨성대 지반응답해석은 1차원 해석결과 남쪽 시추공1에서 약 1.85배, 북쪽 시추공2에서 1.69~1.73배 지반 최대가속도 증폭이 발생하였다.<sup>11</sup> 첨성대는 현재 북쪽으로 약 2~3° 기울어져 있는 상태이며, 이와 관련하여 다수의 연구자들에 의해 첨성대 3D 스캔, 모형시험, 지반물리탐사 등이 수행되어 있다. 대체로 과거 첨성대 북측 인접지에 있던 대로에서 발생한 지반진동이 조립질 지반 침하를 유발하게 하여 기울어지게 하였을 가능성이 있다고 추정되고 있다.<sup>12</sup>

<sup>10</sup> 국립문화재연구소·KAIST, 『건축문화재 지진·홍수 재해위험도 평가연구』, p.284.

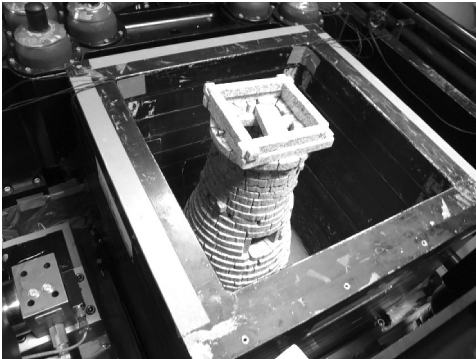
<sup>11</sup> 국립문화재연구소·KAIST, 위의 책, p.130.

<sup>12</sup> 김상규(2003)·손호웅·김성범(2004)은 다양한 지반 물리탐사 수행 및 첨성대 모형 제작 및 시험을 통한 고유진동

첨성대는 신라 선덕여왕 때 만들어진 동양 최고대 천문 관측대로 알려져 있다. 화강석을 판석으로 만든 기단 위에 원통형으로 석단을 27단으로 쌓아올리면서 체감을 조절하여 호리병 모양 곡선 입면으로 축조되어 있다. 최상단에는 장대석을 2단으로 우물정자(井字) 형태로 쌓아 마감하였다. 첨성대는 속도감 있는 경쾌한 곡선 입면과 사각 정자석틀로 마감한 최상단 경계처리 등에서 현대적 감각의 조형미와 독특한 원통형 병 모양에서 이국적 정서마저 느껴지게 한다. 자연스런 곡선 입면과 기능성에 따른 직선을 조화롭게 구성한 수준 높은 건축미를 담고 있는 문화재라고 할 수 있다. 지진에 대한 구조성능을 파악하기 위한 원심력 진동대시험 모형은 1/15 크기로 화강암(황등석)을 이용하여 제작하였다.

원심모형 진동대시험에서는 1/15 크기 모형에 대해 중력가속도의 15배인 15g 원심력을 수직으로 가해 하중과 상사비를 고려해 실시하였다. 모형제작에 사용한 황등산 화강암은 샘플시편의 FFRC 시험 및 밀도시험을 통해 탄성과 속도, 탄성계수 및 밀도를 계산하였다. 첨성대에 사용된 경주 남산 화강암은 전단파속도가 2295m/s 정도로 산정되어 있다. 모형제작 석재 밀도와 강성은 실제 첨성대와 큰 오차를 보이지 않아 원심모형시험에서 실제 지진거동을 모사함에 신뢰도를 확보할 수 있게 하였다.

첨성대 시험모델은 몸통 부위에 가로질러 연결된 井字石을 설치한 모형<sup>1)</sup>과 정자석을 제거한



도 4 첨성대원심모형 진동대 시험(국립문화재연구소, 『석조문화재 안전관리 방안 연구보고서 -첨성대를 중심으로-, 2011)



도 5 첨성대 전경(필자 촬영)

수 예측 등의 연구를 수행하였다. 장경수(2004)는 3D 스캐닝 시스템을 이용한 첨성대 디지털 복원 관련 연구를 수행하였다.

모형2 2가지로 제작하여 수행하였다. 붕괴방지 2등급수준(재현주기500년) 지진을 가한 결과 모형1은 15g중력 1초 지진에서 1.4mm 변위가 발생하였고, 모형2는 3.7mm 변위가 발생하였다. 한편 침성대 최상단 정자석은 동측 부재가 서쪽에 비해 변위가 크게 계측되었다. 이 시험결과에 기초해 실제 침성대 규모로 환산한 변위 값은 15초간 지진에서 각각 21mm, 55mm로 나타났다. 또한 침성대 남측 개구부 위 몸통 중간 19, 20단과 25, 26단에 우물정자(井字) 형태로 가로질러 결구된 장대석(심석)은 내진성능 기능을 지닌 중요한 구조 부재임으로 파악되었다. 비교적 지진에 취약한 조적식 구조로 이루어진 침성대 정자석과 불국사석축, 석굴암 등에 사용된 돌뭇(심석)은 이 시험을 통해 횡방향 하중, 곧 지진진동에 대비한 구조성능을 확보하였음을 알 수 있다. 이처럼 석가탑과 침성대에 내재되어 있는 내진 역사적 고건축 구조기술은 구조원형과 축조원리 규명에 따른 수리복원이 효과적이고 진정성 있는 문화재 지진대응 방법임을 알 수 있게 한다.

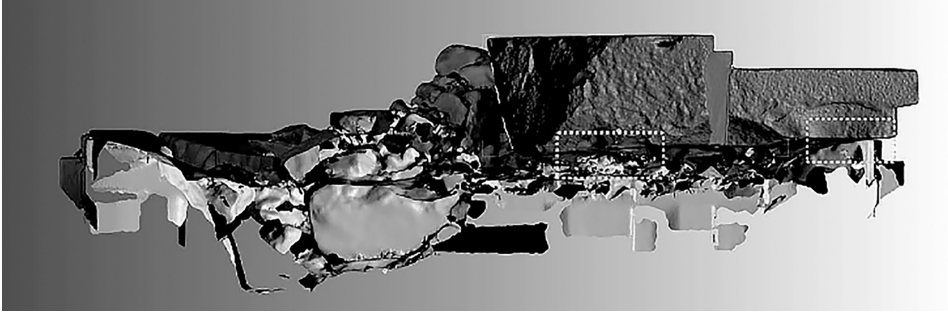
#### IV. 해체수리 공법

석가탑은 2010년 12월 국립문화재연구소에서 실시한 정기안전점검 결과 상층 기단 북동 측 감석이 절단되었으며, 중심축이 기울어진 훼손현황을 발견하였다. 기단감석 균열원인은 1차로 내부 적심이 침하되어 공극이 형성되었고, 그로인해 상부 부재에 인장응력이 발생 증가함에 따른 결과로 밝혀졌다. 훼손현황과 기단감석 균열원인에 따라 석탑은 해체수리를 요하게 되었다. 석재는 인장강도가 매우 취약한 재질 특성을 지니고 있다. 이러한 균열원인에 따른 해체수리 공법에 대한 개선과제는 우선 기단 내부에 채워지는 적심을 안정적으로 구축할 수 있는 방안을 요하게 되었다. 아울러서 기단감석 등 상하 부재 접촉면에는 인장응력 발생을 방지하기 위한 공법개선도 필요하게 되었다.



도6 기단 내부 적심현황(필자 촬영)

석가탑 기단은 해체조사를 통해 적심 중심부에 비교적 큰 자연석을 쌓아올린 심주구조가 발견되었다. 기단적심 중심부는 자연석을 사용해서 수직 중심축이 형성될 수 있도록 쌓아올린 형태로 노출되었다. 자연석 쌓기로 이루어진 중심석축 상부에는 가로 123cm, 세로 125cm, 두께 30cm로 평평하게 가공된 판석이 끼워져 있었다. 정교

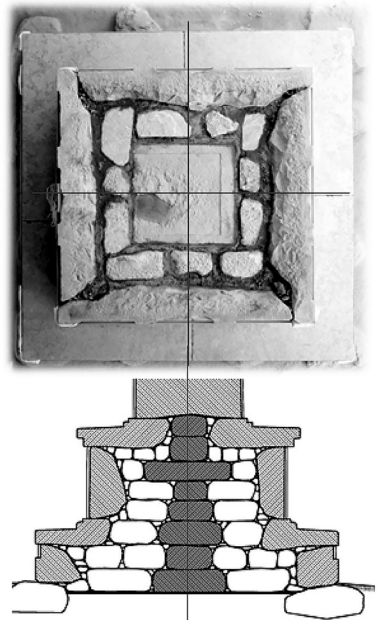


도7 기단 적심상태 3D 스캐닝 단면분석(국립문화재연구소·경주시, 『경주 불국사 삼층석탑 수리보고서I』, 2017)

하के 잘 다듬어진 이 판석은 중심축 기준과 관련된 석탑 쌓기 규준공법을 고찰해 볼 수 있는 중요한 단서로 남아 있었다. 판석 위에는 다시 큰 자연석을 배치한 다음 잔자갈을 고르게 퍼 깔아 기단갑석을 받치도록 되어 있었다. 잔자갈 층은 12~17cm 두께로 조사되었다.

중심축을 제외한 기단내부 적심은 비교적 작은 돌을 채워쌓기 하면서 공극에 흙을 다져 메웠던 상태로 드러났다. 적심은 다짐 흙 유실로 내려앉아 기단갑석 하부에 부분적으로 얇은 공백부분을 형성하게 되었다. 이 공백부분은 기단갑석에 대해 비지지점으로 이루어져 인장응력 발생 부위가 되었다. 갑석 뒤 뿌리가 모이는 중앙 부분에 기단적심은 1층 탑신 하부 바닥면까지 가득 채워져 있었던 상태로 노출되었다. 이러한 적심상태로 인해 기단 상대갑석은 원래 하부 바닥면 전체에 걸쳐 접지되는 등분포 지지구조에서 기단면석 상단과 적심중심에 집중된 지점구조로 변형되었다. 결국 북동 측 기단갑석은 상부 하중에 의한 인장응력을 견디지 못하고 동서로 길게 절단되었으며 해체수리에 대한 주원인이 되었다.(그림 6).

해체조사를 통해 발견된 훼손요인은 재료개선과 적절한 공법적용을 필요로 하게 되었다. 상대갑석 절단 원인으로 밝혀진 적심침하는 다짐 흙이 오랜 세월이 걸친 건조와 계절변화에 따라 반복된 동결융해 과정을 거치면서 유실된 결과로 파악되었다. 적심에 사용된 흙은 성분분석 결과 강회 등 장기적 내구성을 유지할만한



도8 +자먹규준(필자 작성)

첨가물 없이 자연 토사만으로 이루어져 있었다. 다짐 흙은 적심석 채움 구조를 안정적으로 유지하기 위해 지속성 있는 점질개선 보완이 필요하다고 판단되었다. 또한 상부 탑신에서 전달되는 하중에 비해 상대적으로 두께가 얇은 상대갑석은 고른 등분포하중 면 지지구조를 이루기 위해 흙다짐 접촉면 시공이 필요함으로 검토되었다. 이러한 분석결과에 따라 흙은 무기질 보수재료<sup>13</sup>를 첨가하여 시공함으로써 재료성능을 개선하였다.

기단적심 중심부에 자연석 쌓기로 형성되어 있는 수직 중심축은 석가탑에서 발견된 중요한 구조법으로 평가되었다. 적심부 중심축은 기단 상부에 구성되어 있는 석탑 하중 대부분을 지지하며 하부 기초지반으로 전달하는 구조기능을 지니고 있다. 이 중심축과 1층 탑신석 사이에서 지지 접촉면이 형성되지 않았을 경우에 석탑 상부 하중은 기단갑석으로 전달되게 된다. 이러한 상태에서 기단갑석은 석가탑에서처럼 절단되거나 감은사탑, 부여 무량사 오층석탑 등에서처럼 외측 단부가 모멘트를 받아 쳐들리는 변형이 발생된다. 기단이 면석과 적심으로 축조된 대부분의 고대 석탑에서 흔히 발생하는 훼손현상이다.

석가탑 기단 적심에서 중심축 쌓기는 +자먹을 이용한 전통건축 기준 기법을 적용 시공하였다. +자먹을 이용한 規準<sup>14</sup>工法은 다림추와 먹줄을 이용하는 고대로부터 전승된 기술이라고 할 수 있다. +자먹과 다림추를 이용한 수직보기는 오늘날에도 고건축 현장에서 사용하고 있는 일반적인 규준방식이다. 고건축 부재조립에는 기본적으로 +자먹을 이용해서 중심축을 맞추고 있다. +자먹은 부재중심을 직교하는 먹줄이므로 형태와 크기에 상관없이 2개 축선을 일치시켜 조립해 두 부재 사이에 중심축이 형성될 수 있도록 하는 고건축시공 규준기법이다.<sup>15</sup>

석가탑 기단 적심시공에는 +자먹 중심축 규준기법을 적용하여 시공하였다. 중심축은 수직으로 기단 하단에서 상륜 꼭대기까지 정확히 시공될 수 있도록 토탈스테이션과 레이저수평 측량기기를 이용해 정밀도를 높였다. 시공과정에서 탑신석과 옥개석, 각종 상륜부재 등 모든 부재에는 +자먹을 표기하여 개별 중심축을 확보하고 측량기계로 측정 설치하여 오차를 최소화하였다. 이러한 현대 계측장비 활용은 전통적 규준기법을 보다 정확히 실현함으로써 계승과 발전이라는 역사적 관점을 분명히 하였다.

<sup>13</sup> 무기질 보수재료: 산화마그네슘(MgO), 이산화규소(SiO<sub>2</sub>), 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)등을 주원료로 하는 무기질 재료를 흙이나 모래와 배합하여 필요한 강도와 흡수율, 내산성 등 재료성능을 확보하고, 시멘트의 부작용인 백화현상이 발생하지 않도록 개량한 재료임. 국립문화재연구소, 『2015 석조문화재 수리와 보존관리 국제학술포지업』(국립문화재연구소, 2015), p. 25.

<sup>14</sup> 規準: 規矩準繩의 줄임말로 건축시공에서 수직 수평 등 측량의 기준점 또는 기준실을 이룸.

<sup>15</sup> 김덕문, 「첨성대 축조규준방식과 드잡이기술에 대한 기술사적 접근연구」, 『문화재』 제45권 제4호(2012), p. 92.

탐신석과 옥개석으로 구성되는 각층 부재별 접촉면이 형성되는 켜 사이에는 티타늄 편을 사용해 부재수평을 확보하고, 무기질재를 혼합한 흙을 깔아 침식을 방지하여 보다 지속적인 내구성을 확보토록 하였다. 일반적으로 석탑 부재는 접촉면을 이루는 윗면과 아랫면 치석에서 외부에 노출되는 테두리 부분을 대략 1寸 정도 폭으로 평평하고 조밀하게 가공한 다음 내측면 전반에 걸쳐 거칠고 약간 깊게 파내는 기법으로 치석되어 있다. 이러한 치석기법은 외면 테두리 가공에서 철평사용을 최소화 하고, 탑재를 정확히 수직 수평으로 쌓아올릴 수 있도록 한 간편하고 합리적인 시공성을 담고 있다. 거칠게 파내어진 내측 면에는 흙을 깔아 상부 탑재를 쌓아올렸을 때 다져짐과 동시에 하중전달 접촉면이 형성되어 테두리 부분에 집중하중이 발생되지 않게 하고 있다. 치석기법에서 탑재 쌓기까지 유기적으로 연결된 석탑 축조기술은 충격이나 집중하중에 취약한 석재 재질특성을 고려해 안정성을 추구한 고대 장인들이 지닌 직관적 구조기술로 이해된다.

석가탑 해체조사 과정에서 밝혀진 +자막을 이용한 중심축 규준공법과 부재 치석기법 등에는 구조 안정성을 추구한 축조원리가 담겨져 있다. 구조 안정성을 확보하기 위한 석가탑 수리 공사는 조사 파악된 역사적 기술에 대한 신뢰를 바탕으로 현대 계측장비를 사용하여 보다 정밀하게 시공하고자 하였다. 흙과 고임 철평 등 내구성이 취약한 재료는 당초 적용되었던 공법을 준수하면서 무기질재를 첨가 혼합하거나 내부식성 티타늄으로 대체 시공하여 부작용을 억제하고 내구성능을 개선하였다.

## V. 9.12경주지진 현황 분석

2016년 9월 12일 19:44:33(대한민국 표준시) 경주시 남서쪽 약 10km 지점에서 리히터지진 강도 5.1 지진이 발생하였다. 5.1 전진에 이어 20:32:54에 경주시 남서쪽 약 11.6km 위치에서 5.8 본진이 발생하였다. 규모 5.8 지진은 국내 지진계측 이래 가장 큰 규모로 지진재해에 대한 국가적 경계심을 크게 불러일으켰고, 우리나라도 더 이상 지진 안전지대가 아님을 확인시켜 주는 계기가 되었다.<sup>16</sup>

지진위험도 평가연구를 통해 붕괴방지 특등급 수준의 재현주기 2400년 지진에 안전한 수준으로 확인된 석가탑은 건전한 상태로 유지관리 될 경우 충분한 내진 구조성능을 갖추어 건축

<sup>16</sup> 이도형·심재엽·전종수, 「2016년 경주지진에 의한 국내 도시철도 교량의 잠재적 손상평가」, 『한국지진공학회 논문집』 20권 7호(2016.12), p. 461.

되었다고 볼 수 있다. 다만 지진발생 직전에 해체 수리된 내용은 문화재 수리복원과 지진대책 방향을 제시하기 위해 9.12경주 지진현상과 함께 구체적인 분석고찰이 필요하다. 석가탑은 국립문화재연구소에서 2012년 10월부터 2014년 6월까지 해체조사를 실시하였다. 이어서 수리계획을 수립하고 2015년 1월부터 2016년 4월까지 약 1년 4개월에 걸쳐 적심석을 제외한 기단 40매(하층기단 28매, 상층기단 12매), 탑신 6매, 상륜부 18매 총 64매석에 대한 복원공사가 이루어졌다. 수리복원공사는 2016년 7월에 완료되었다. 그리고 석가탑은 9월 12일 9.12경주지진을 겪었다. 수리복원 중 중심축을 비롯한 주요 구조지점에 설치한 계측점검 표적은 안정성평가와 지진대책 연구에 중요한 데이터를 확보할 수 있게 하였다.

석가탑에는 탑재 조립과정에서 서측과 북측면 중심축선에 각 층별로 변위 측정용 표적을 부착해 놓았다. 9.12경주지진(진도 5.8)발생 직후 측정된 석가탑 구조변위는 작지만 부위별로 다른 크기로 측정되었다. 특히 주목되는 변위는 2층 옥개석 측점(2C)에서 발생한 반시계방향(-)으로 수평 이동한 1.2cm 거동이었다. 반면 옥개석 양단에서 측정한 수평 기울기는 변동이 없는 상태로 조사되었다. 계측된 2층 옥개석 거동은 수평을 유지하면서 1.2cm 회전하였다고 볼 수 있다. 나머지 다른 부위에서 측정된 계측 치와 함께 검토해 보면, 석가탑 지진거동은 수직 중심축을 유지하면서 부재별로 미세한 회전거동이 이루어진 양상을 보이고 있다. 지진 발생 전 시공 당시에 설치된 2층 옥개석 2C' 측점은 1층 탑신 1C(±0 기준점)에 대해 1.4cm가 벗어나 있었다. 2층 옥개석 지진거동은 기준점 1층 탑신 1C(±0)에 대해서 오히려 수직 중심축선에 0.2cm 더 근접한 위치로 이동한 것으로 측정되었다. 이를테면 석가탑에서 나타난 지진진동에 의한 구조거동은 중심축과 수평 기울기 변화 없이 부재에 따라 미소한 회전거동만 발생하였다고 볼 수 있다.

석가탑에서 나타난 지진거동은 일반적인 구조물과 다른 특징을 보이고 있다. 파동형태로 이루어진 지진력은 지반으로부터 구조물에 전달되면 일반적으로 상층부에 이룰수록 증폭된다.



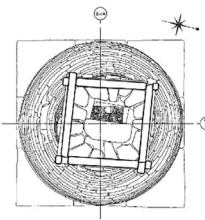
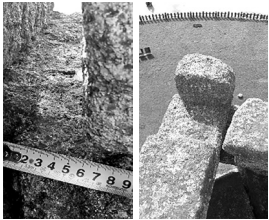
〈표 2〉 석가탑 지진 전후대비 계측 점검표

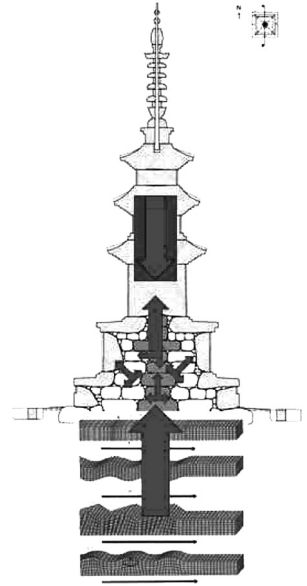
월별	N							W						
	R_C	3_C'	3_C	2_C'	2_C	1_C'	1_C	R_C	3_C'	3_C	2_C'	2_C	1_C'	1_C
16.05	8	7	6	14	14	12	0	-5	-3	-3	7	1	1	0
16.07	7	8	6	13	14	11	0	-5	-3	-4	6	0	1	0
16.09	13	10	2	2	11	5	0	-9	-11	-8	-5	-2	-6	0
전화대비	6	2	-4	-12	-2	-6	0	-5	-8	-3	-11	-1	-7	0
누적대비	5	3	-4	-12	-3	-7	0	-5	-8	-4	-12	-2	-7	0

(중심축 기준점±0mm:1층 탑신 측점 1\_C)

〈표 3〉 침성대 지진진동 모형시험과 9.12경주지진거동 비교

(좌: 국립문화재연구소, 『석조문화재 안전관리 방안 연구보고서 -침성대를 중심으로-, 2011, 우측하단: 필자 촬영)

	모형1(정자석구비)	모형2(정자석제거)
지진진동시험		
경주지진거동		



도 9 석가탑 지진진동(필자 작성)

석가탑에서는 3층 옥개석에서 2층 옥개석보다 작은 변위가 이루어졌다. 이러한 거동특성은 석가탑에서 지진진동이 상층부에 이르면서 減衰되어 나타나게 된 현상으로 고찰된다. 석가탑 기초와 기단적심은 크고 작은 자연석으로 쌓고 공극에 흙다짐을 한 구조로 이루어져 있다. 지진진동은 불규칙하게 이루어진 자연석 맞댐 면을 통해 탑신으로 전달되는 과정에서 분산과 합성이 이루어지게 되어 있다. 파동으로 전달되는 지진력은 기초와 기단부에서 분산간섭이 이루어지고 1층 탑신에서 다시 합성되면서 1차로 감쇠되었을 것으로 보인다. 그리고 탑신과 옥개석 등 부재 사이마다 무기질 재료와 혼합반죽 시공된 흙다짐 켜에서는 지진파가 전달되는 과정에서 매질 차이로 인해 다시 또 1차적인 감쇠현상이 생겼을 것으로 보인다. 하부 적심과 부재 사이에 시공된 흙다짐 켜는 석가탑 전체 구조체계에서 지진진동을 감쇠시키는 일종의 댐퍼기능 작용을 하였던 것으로 고찰된다.

한편 평면상 전후좌우로 2축 대칭을 이루며 수직 중심축에 맞추어 구축된 석가탑 전체 무게중심은 1층 탑신 중심에 위치하여 구조적 안정성을 더하고 있다. 수직 중심축에 맞추어 조립된 개별 부재들 또한 힘의 전달과정에서 편심이 발생되지 않도록 하여 안정적인 구조를 이루도록 시공되었다. 이러한 석가탑 해체수리 공법과 내진구조는 실험을 통한 확인검증 후 석조문화재 지진해재 대책기술로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.


침성대는 원심모형 진동대 시험에서 붕괴방지 1등급 (재현주기 1000년) 가진 시에 정자석과

상부부재가 이탈하였다. 몸통 정자석 결구를 제거한 모형2에서는 상단 정자석과 몸통 상부 부재 탈락이 이루어졌다. 한편 9.12경주지진 발생에 따른 침성대 상단 정자석 변형은 진동대 시험 구조 거동 현상과 비슷한 양상으로 나타나 흥미롭게 보인다.

지진발생 직전 침성대는 중심축이 20cm 정도 북측으로 기울어져 있었다. 9.12지진(진도 5.8) 발생으로 중심축 기울기는 2cm 정도 추가 진행 증가되었다. 상단에 정자석은 이미 지진발생 이전에 동남측과 서편 양단 모서리 결구가 파손된 상태로 놓여 있었다. 9월 12일 지진진동에 의해 정자석은 동남측 모서리에서 5cm 정도 이격이 증가된 부재 이동 변위가 발생하였다. 반턱맞춤으로 결구된 정자석 모서리에 나타나 있는 훼손 형태는 (재현주기 1000년) 가진 진동대 시험 결과 모형 1(몸통 정자석 구비)과 거의 똑같은 현상으로 관찰된다. 진동대 시험에서 반턱맞춤이 파손되고 정자석이 움직이면서 전체 사각형 구조가 일그러지는 현상은 현재 침성대 상단 정자석 훼손상태와 비슷한 점에서 과거 지진피해가 있었음을 짐작케 한다.

한편 장자석을 제거한 모형2에 대한 진동대 시험은 재현주기 1000년 수준 가진에서 구조거동이 크게 일어나며 침성대 상부가 무너지는 심각한 결과를 보여주고 있다. 이를테면 침성대는 구조 변형이나 결함이 있는 상태에서 붕괴방지 1등급 수준(재현주기 1000년) 지진이 발생하였을 경우에 심각한 피해발생을 예측케 한다. 9.12경주지진(진도 5.8)은 재현주기 1000년 수준보다 조금 낮은 정도로 발생하였다. 그럼에도 침성대 중심축은 2cm 정도 더 기울어지는 구조거동과 정자석 변형 피해를 입었다. 기울어져 있는 중심축과 상단 정자석 모서리 접합부 파손, 기단부 부등침하, 몸통부 부재이격 등 현재 침성대 구조 상태는 지진진동에 불안정함을 경고하고 있다.

〈표 4〉 9.12경주지진 침성대 계측점검 결과

측정모델		측정 데이터 분석결과			
	위치	중단 수평변위(배부름)		상단 수평변위(기울어짐)	
	일자	동b	북b	동a	북a
	14. 09. 15	410.6	341.8	1109.5	956.4
	16. 07. 07	407.4	341.2	1106.2	957.6
	16. 09. 13	406.1	338.1	1099.3	935.1
	전회대비	-1.2	-3.2	-6.9	-22.5
	초기대비	-4.5	-3.7	-10.2	-21.3
침성대 최상부 정자석 뒤틀림(시계방향 회전) -북a 측정값의 변화가 -22.5mm로, 북측으로 약 2cm 가량 기울음 -동a 측정값의 변화가 -6.9mm로, 동측으로 약 7mm 가량 기울음					

석기탑과 침성대에 대한 지진 위험도 평가연구와 해체수리, 9.12경주지진 현장 계측점검은 건축문화재 지진피해 현상을 보다 구체적으로 파악할 수 있도록 하였다. 조직식 구조로 이루어진 석탑과 침성대 등 석조 문화재는 9.12경주지진 발생으로 크고 작은 피해가 발생하였다. 문화재는 역사성 있는 원형보존에 궁극적인 목표를 두고 관리된다. 문화재에 대한 지진 대응은 구조적 측면에서 원형보존을 전제로 하는 구체적 실천방법을 필요로 한다.

현대 구조물 내진설계 기준과 방법을 직접 적용하기 어려운 문화재 지진 대응은 구체적인 공학적 해결책을 제시하기 어려운 과제임에 틀림없다. 아직 확신 있는 내진구조기준이 정립되지 않은 문화재 구조물은 9.12경주지진 현장 점검분석을 통해 지진위험도 평가와 내진성능 규명이 선행되어야 할 과제로 파악되었다. 한편 9.12경주지진 발생에 따른 계측조사는 불국사 삼층석탑 공사내용 분석을 통해 석조문화재 지진대책을 마련에 필요한 기초자료를 확보할 수 있도록 하였다. 불국사 삼층석탑과 침성대에 대한 지진진동 시험연구 결과와 해체수리 공법, 9.12경주지진 현장 계측데이터에 대한 분석고찰은 그동안 피상적으로만 여겨졌던 문화재 지진대응 방법에 관해 보다 구체적으로 접근할 수 있는 계기가 될 것으로 기대된다.

## VI. 결론

경주 불국사 삼층석탑은 창건(경덕왕 원년 742)이래 지금까지 탑신을 비롯해 주요 구조부가 유지되고 있다. 그 구조는 지진진동 실험연구결과 대단히 뛰어난 내진성능을 갖추고 있음으로 밝혀졌다. 연구결과에 따라 해체수리는 역사적 기술로 이루어진 구조원형에 대한 신뢰를 바탕으로 진행되었다. 이러한 해체수리 내용과 9.12경주지진 현상을 비교분석해 본 결과 석탑 수리복원에 참고할만한 중요한 결론을 얻어낼 수 있었다.

1. 구조 원형은 처음 석탑을 쌓아올릴 때 적용하였던 規準技法과 역학적 인식에 기초한 구조원리를 파악하여 정밀시공 복원하여 진정성을 확보하고자 하였다. 또한 구조복원은 석탑의 구조성능을 최대한 발휘하게 하는 핵심요소로 파악되었다.
2. 해체조사를 통해 드러난 축조공법은 재료에 대한 내구성능을 개선하여 지속적인 안정성을 확보할 수 있도록 하였다.
3. 불국사 삼층석탑은 지진진동 실험연구와 9.12경주지진을 비교분석해 본 결과 한국 내진설계 기준에 근접한 내진구조성능을 지니고 있는 것으로 확인되었다.

4. 불국사 삼층석탑 해체수리는 그동안 체감과 양식기법에 치중되어 있던 석탑 원형보존에 대한 시각을 구조와 공법적 측면으로 확대 전환시킬 수 있는 계기를 마련하였음에 의의가 있다.

**\*주제어(key words)** 9.12지진(9.12 Earthquake), 경주지진(Gyeongju Earthquake), 지진 위험도(seismic hazard), 문화재(cultural properties), 전통구조(traditional structure), 해체수리(reconstruction), 원형보존(preservation of originality), 계측점검(measuring investigation), 불국사 삼층석탑(Three-Story Pagoda in Bulguk-sa Temple), 첨성대(Chamseongdae), 지진 안정성(seismic stability), 내진설계(seismic design), 내진구조(seismic structure), 지진진동(seismic vibration), 지진거동(seismic behavior), 지진실험(seismic experiment), 지진 대응(seismic response)

■ 투고일 2017년 6월 19일 | 심사개시일 2017년 6월 21일 | 심사완료일 2017년 7월 20일 ■

## 참고문헌

### 1. 한국어 문헌

- 국립문화재연구소, 『2015 석조문화재 수리와 보존관리 국제학술심포지엄』, 국립문화재연구소, 2015.
- \_\_\_\_\_, 『석조문화재 안전관리 방안 연구보고서 -첨성대를 중심으로-』, 국립문화재연구소, 2011.
- 국립문화재연구소·KAIST, 『건축문화재 지진홍수 재해 위험도 평가 연구』, 국립문화재연구소, 2011.
- 국립문화재연구소·경주시, 『경주 불국사 삼층석탑 수리보고서I』, 2017.
- 국립문화재연구소·충남대학교 산학협력단, 『서울지역 건축문화재 지진·홍수 위험도 평가를 위한 기초연구』, 국립문화재연구소, 2011.
- 국립중앙박물관, 『불국사 석가탑 유물 2. 중수문서』, (주)시티파트너, 2009.
- 국립중앙박물관·대한불교조계종, 『불국사 석가탑 유물2. 중수문서』, 국립중앙박물관·대한불교조계종, 2009.
- 김덕문, 「첨성대 축조규준방식과 드잡이기술에 대한 기술사적 접근연구」, 『문화재』 제25권 제4호, 2012.
- 오경후, 「17世紀 佛國寺古今創記와 湖南의 寺刹事蹟記」, 『신라문화』 Vol. 19, 2001.
- 이도형·심재엽·전종수, 「2016년 경주지진에 의한 국내도시 철도 교량의잠재적 손상평가」, 『한국지진공학회 논문집』 20권 7호, 2016.

## 국문초록

2016년 9월 12일 리히터지진강도 5.8 경주지진 발생은 문화재 보존관리에 대해 인식을 달리하게 하였다. 특히 조적식 구조로 이루어진 석탑과 첨성대 등 석조 문화재는 지진에 보다 취약하며 크고 작은 피해가 발생하였다. 문화재는 역사성 있는 원형보존에 궁극적인 목표를 두고 관리된다. 문화재에 대한 지진대응은 구조원형과 함께 장소성에 따른 진정성이 확보된 제한 속에 구체적이고 실천력 있는 방법을 필요로 한다.

문화재는 제조규격 재와 내진설계기준에 맞추어 축조된 현대 건축구조물과 달리 천연 재를 사용하여 장인의 직관적 구조기술로 이루어져 있다. 또한 문화재 지진대응은 사용 경제성을 떠나 역사적 의미와 가치를 담고 있는 원형보존에 목표를 두고 있다. 문화재 원형(originality)보존을 위한 실천사항은 역사적 측면에서 진정성 있는 보편적 기준으로 제한되고 있다. 문화재 지진대응 방법은 원형을 보존하여 역사적 진정성을 확보하기 위한 접근과정에서 구조와 재료에 대한 여러 가지 공학적 한계점이 나타나게 된다. 문화재 지진 대응은 현대건축 구조물 내진설계법과 다른 보다 다양한 설계변수를 고려한 섬세하고 특별한 방법이 요구된다.

현대 구조물 내진설계 기준과 방법을 직접 적용하기 어려운 문화재 지진 대응은 구체적인 공학적 해결책을 제시하기 어려운 과제임에 틀림없다. 아직 확신 있는 내진구조기준이 정립되지 않은 문화재 구조물은 9.12경주지진 발생과 현황조사 분석에 기초한 지진위험도 평가와 내진성능 규명 작업이 우선적으로 필요하며 나아가 지진대응 연구 시발점이라 할 수 있다. 한편 지진발생 이전에 지진위험도평가 연구와 함께 해체 수리가 이루어진 불국사 삼층석탑은 문화재 지진대책 마련을 위한 실제적 사례로서 검토가 필요하다.

불국사 삼층석탑과 첨성대 등 경주지역 주요 문화재는 최근 '지진 위험도 평가연구'가 이루어졌다. 그리고 2016년 7월 해체수리가 완료된 불국사 삼층석탑은 9.12경주지진 발생에 따른 계측조사가 이루어져 중요한 공학적 데이터가 수집되었다. 지진규모와 계측데이터는 불국사 삼층석탑 공사내용과 함께 석조문화재 지진대책을 마련하기 위한 근거자료로 활용될 수 있다.

'지진 위험도 평가연구'에서 수행된 불국사 삼층석탑과 첨성대에 대한 지진진동 실험연구 결과와 해체 수리 공법, 계측데이터에 대한 분석고찰은 그동안 피상적으로만 여겨졌던 문화재 지진대응 방법에 대해 보다 구체적으로 접근할 수 있는 계기가 될 것으로 기대된다.

## Abstract

# Reconstruction of the Three-Story Pagoda in the Bulguk-sa Temple and Analysis of the 9.12 Earthquake in Gyeongju

Kim, Derkmoon\*

The earthquake with a magnitude of 5.8 in Gyeongju on September 12, 2016, changed our perception of conserving cultural heritage. Masonry structures such as a stone stupa and Cheomseongdae are vulnerable to earthquakes and thus, there were some major and minor damages due to the earthquake. Cultural properties are managed ultimately in pursuit of preservation of original form based on historicity. The rescue of cultural properties from earthquakes should be based on the restoration of the structures and requires detailed and feasible resolution once the historical authenticity of the site has been established.

Unlike modern architecture, which is constructed in accordance with seismic design criteria using standardized material, cultural properties were built using architects' intuitive skills and natural materials. In addition, coping with the effects of earthquakes on the cultural properties aims not at economic efficiency but at preserving their originality, which is embedded with historical meaning and value. The protocol to preserve the originality of the cultural properties is limited to universal standards of maintaining historical authenticity. One will encounter engineering limitations regarding structures and materials in the course of preserving originality and ensuring historical authenticity. Managing the effects

---

\* National Cultural Properties Research Institute

of earthquakes on the cultural properties thus requires a special and delicate approach with consideration of various design variables, which is different from the seismic design of modern architecture.

Managing the effects of earthquakes on cultural properties involves the undeniably difficult challenge of proposing engineering resolutions because it is difficult to apply modern seismic design criteria. Cultural properties that have not established proven seismic design criteria first require assessment of seismic risk and investigation of seismic function based on the Gyeongju earthquake on September 12 and analysis of the present condition. This will be the starting point of the study on seismic response. On the other hand, in order to devise a proper measure of the effects of earthquakes on cultural properties, it is also necessary to review the case of the Three-Story Pagoda in the Bulguk-sa Temple, for which both an analysis of earthquake hazard assessment and reconstruction of the pagoda had been completed before the earthquake occurred.

Major cultural properties such as the Three-Story Pagoda in the Bulguk-sa Temple and Cheomseongdae were recently analyzed for seismic risk assessment (“Study of Seismic Risk Assessment”). Moreover, a measuring investigation due to the 9.12 Gyeongju earthquake was achieved for the Three-Story Pagoda in the Bulguk-sa Temple, for which reconstruction had been completed in July 2016, so that meaningful engineering data was collected. Along with the details of the reconstruction of the Three-Story Pagoda in the Bulguk-sa Temple, magnitude and measured data can be applicable to establish proper ways to manage stone cultural properties when an earthquake occurs.

A seismic vibration experiment as a result of “the Study of Seismic Risk Assessment,” reconstruction method, and analysis of the measured data will provide the opportunity to develop a detailed response method to the effects of earthquakes on cultural properties, which has been conceived only in a superficial way.