

초가집 1/2 축소 모델의 지진 실험

Seismic Test of a 1/2 Scale Model of Wood House with Thatched Roof

류혁* 김재관** 허영철*** 전봉희****

Ryu, Hyeuk Kim, Jae Kwan Huh, Young Chul Jeon, Bong Hee

ABSTRACT

To improve the reliability of seismic hazard assessment of historic earthquake, shaking table test of a 1/2 scale model of wood house with thatched roof was performed. Scaled model was constructed through rigorous verification process to have quantitative relationship between the intensity of earthquake and damage state. The completed model was mounted on a shaking table and subjected to the dynamic tests. Two kinds of tests were performed: exploratory test and fragility test. The exploratory test was done with low intensity shaking. In the fragility test, the behavior of the model was carefully monitored while increasing the shaking intensity. The construction details of the model are provided and test procedures are reported. Finally important test results are presented and their implications are discussed.

1. 서론

우리나라에서는 유사 이래 강한 지진이 여러 차례 발생하여 피해를 초래하였다는 사실이 조선왕조실록과 같은 역사서에 수록되어 있다[1, 2]. 현재 우리나라의 내진설계를 위한 설계지진의 세기는 주로 역사서에 기록된 역사지진에 의한 피해상황으로부터 추정된 지반운동의 세기나 지진 규모에 의거하여 확률적으로 결정된다[3]. 그러나 역사서에 의한 피해기록만을 근거로 역사지진의 세기를 평가하는 작업은 연구자의 주관적인 평가로 인하여 높은 불확실성이 존재한다. 따라서 고증을 통해 피해 구조물을 충실하게 복원하고 여러 가지 종류의 지반운동에 대하여 취약도 실험을 수행한 후 지반운동의 세기와 피해수준과의 관계를 정량적으로 도출한다면 역사지진의 세기를 보다 신뢰성 있게 평가할 수 있을 것이다.

조선시대 가옥의 형태는 크게 기와집(瓦家)과 초가집(草家)으로 나뉘는데 조선왕조실록에 기록

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수
*** 정회원 · 한국기계연구원, 선임연구원
**** 정회원 · 서울대학교 건축학과, 교수

된 가옥에 해당하는 용어 중 屋宇, 屋, 人家는 초가집을, 館宇는 기와집을 뜻하며 屋舍, 家舍는 구별하지 않고 쓰였다[4]. 초가집의 경우 기록된 피해는 대부분 가옥 전체의 피해로 '집이 흔들렸다'라고 기록되어 있으며 가장 큰 피해로 '부서지고 내려앉았다'고 여러 번 기록되어 있다. 또한 담이나 벽에 대해서는 여러 번에 걸쳐 '무너졌다'고 기록되어 있다.

본 연구에서는 조선시대의 가옥 중 하나인 초가집을 대상으로 전문가의 고증을 받아 공학적으로 대표성 있는 실험 모델을 제작하여 취약도 시험을 수행하고 이를 바탕으로 구조물의 피해수준과 역사지진 세기와의 관계를 정량적으로 평가하고자 하였다. 본 연구는 역사지진 세기 평가를 위한 기와집 실물 크기 모델과 1/2 축소 모델의 지진 실험 연구[5, 6]의 후속 연구로 수행되었으며 선행된 연구로는 신라시대 경주에서 발생한 역사지진의 세기를 정량적으로 규명하기 위한 전통 초가삼간 가옥 축소모델의 지진응답 특성 실험[7, 8]과 1936년 쌍계사 지진의 세기를 추정하기 위한 쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델 실험[9]이 있다.

2. 초가집 1/2 축소 모델 제작

2.1 조선시대 초가집 원형 모델 고증

피해 형태의 재현을 통한 역사지진 세기의 추정을 위하여 현재 남아 있는 고가옥을 대상으로 원형 모델을 선정하고자 하였다. 현재 남아있는 고가옥 중 초가집은 대부분 조선시대 후기 이후에 건축된 것으로, 높은 건축기술이 적용된 기와집과는 달리 기둥의 위치나 부재의 규격이 정형화 또는 규격화 되지 않아서 초가집의 대표적인 구조를 정하기가 사실상 어렵다. 다만 유구와 전문가의 자문을 통하여 초가집의 규모와 구조를 추정하고 이를 기반으로 본 연구의 원형 모델로서 경상북도 영일군 덕동마을의 권택구 가옥을 선정하였다. 권택구 가옥의 지붕틀 구조는 3량, 지붕은 우진 각 지붕이고 공간구조는 부엌-방-방의 세 칸으로 구성되며 방 전면에는 뿔마루를 갖춤으로써 조선시대의 보편적인 초가집 형태를 갖는다. 그림 1은 초가집 원형 모델의 전경이다.

2.2 초가집 1/2 축소 모델 설계

초가집 원형 모델의 크기(6.9m*3.6m)와 진동대의 크기(4.0m*4.0m)를 고려하여 축소 모델의 기하학적 상사율(S_L)을 1/2로 정하였다. 상사 법칙은 중력 효과를 고려한 인공질량 모델 방법을 사용하였다. 인공질량 모델 방법의 경우 무게에 대한 축소율은 1/4이 되어야하나 실제로 제작된 축소 모델의 무게는 1/8이 되므로 추가로 인공질량이 필요하게 된다. 따라서 초가집 1/2 축소 모델의 전체 질량에 해당하는 인공질량이 추가로 적용되었는데, 납피를 사용하여 총 1.65ton의 부가하중을 지붕에 등분포 시켰다.

2.3 초가집 1/2 축소 모델 제작

초가집 축소 모델을 진동대 위에 설치하기 위하여 바닥 프레임을 제작하였고 기둥이 놓일 위치에는 주춧돌을 부착하였다. 초가집의 골조 제작을 위해 강원도에서 채취한 육송 원목을 사용하였으며, 기하학적 상사율에 따라 1/2로 축소된 치수에 맞추어 기둥, 도리 및 인방 등의 골조 부재들이 제작되었다. 바닥 프레임에 고정된 주춧돌 위에 기둥, 도리 그리고 보 부재를 접합시켜서 쌓아 올렸고 지붕은 연목을 사용하여 구성하였다. 목조 프레임으로 초가집의 형상을 갖춘 후 지붕에 적심목을 깔고 납피를 사용하여 부가 하중을 설치하였다. 그 후 지붕에 흙채움을 하고 뱃짚을 사용

해 이영을 얻었다. 벽체는 먼저 가는 목재를 가로 세로로 새끼줄로 얽히게 하여 흙이 잘 부착되도록 만든 후 짚을 섞은 흙을 사용하여 흙채움을 하였고 건조된 후에 고운 흙으로 미장을 하고 그 위에 강회로 마무리를 하였다. 그림 2는 초가집 1/2 축소 모델의 최종 완성된 모습이다.

3. 실험 장치와 Data 획득 시스템

실험은 한국기계연구원이 보유한 30톤 용량의 6자유도 진동대에서 실시되었다. 제작된 축소 모델을 그림 3과 같이 진동대에 탑재하였다. 초가집 축소 모델은 보 방향과 도리 방향에 대하여 다른 동특성을 보일 것으로 판단되어서 x 축을 단축 보 방향, y 축을 장축 도리 방향으로 하는 평면 직교 좌표계를 설정하였다. 초가집 축소 모델의 파괴 실험 시 발생하는 응답 특성을 살펴보기 위하여 변위계(LVDT), 가속도계(Accelerometer), Strain gauge를 설치하였다. 측정된 신호의 취득을 위해 HBM(Hottinger Baldwin Messtechnik)사의 MGC Plus를 사용하였으며, sampling 주파수는 100 Hz로 정하였다.

4. 실험 방법과 절차

4.1 예비실험(Exploratory Test)

낮은 진폭 가진 상태에서 모델의 동특성을 확인하기 위해서 수평 2축 방향(보 방향, 도리 방향)에 대하여 방향별로 각각 백색잡음(White Noise)파로 진동대를 가진하였다. 이 때 백색잡음파의 주파수 범위는 0.0-30.0 Hz이며 최대 진폭은 0.04g이다.

4.2 본실험(Fragility Test)

지진의 세기와 초가집의 피해수준과의 관계를 정량적으로 도출하기 위하여 지반운동세기를 순차적으로 증가시키면서 초가집 축소 모델의 응답 특성의 변화와 피해 형태 및 수준을 조사하였다. 본실험의 입력지반운동으로 기대되는 지진규모와 진앙거리 그리고 지반조건을 고려하여 1940년 El Centro 지진기록과 1987년 Whittier Narrows 지진기록을 사용하였다.

파괴 실험에 앞서 입력 지진의 주파수 성분에 따른 모델의 거동 특성을 관찰하기 위해서 El Centro 지진과 Whittier Narrows 지진을 낮은 세기부터 순차적으로 입력시켰는데 각각에 대해 NS, EW 및 UD 성분을 모두 고려하여 모델의 x , y , z 축 방향을 동시에 가진하였다. 본격적인 파괴 실험에서는 상대적으로 넓은 주파수 성분을 갖는 El Centro 지진파를 선택하였으며, 모델의 x , y , z 축 방향을 동시에 가진하여 초가집의 피해 수준을 살펴보았다. 이 때 입력지진의 세기는 유효지반가속도(EPGA; Effective Peak Ground Acceleration) 개념을 도입하여 그 세기를 정의하였다. 한편, 결과분석의 편의를 위하여 입력지진 세기의 단계별로 "EC00XYZ"로 분류하였는데 "EC"와 "00"은 각각 El Centro 지진파와 X방향의 EPGA 크기를 의미하며, "XYZ"는 3축 동시 가진을 의미한다.

5. 실험 결과

5.1 예비시험

모델의 기둥 상부 및 지붕에 부착된 가속도계에서 계측된 응답 가속도 신호로부터 전달함수를 얻은 후 곡선 적합을 이용하여 고유 진동수와 감쇠비를 구하였다. 전체적으로 1차 모드가 수평 두

축 모두에 대해 지배적이었으며 x 축(보 방향) 및 y 축(도리 방향)의 고유 진동수는 각각 2.65 Hz, 2.38 Hz로써 도리 방향이 보 방향보다 조금 유연한 것을 알 수 있다. 이를 상사율을 적용하여 원형 모델의 고유 진동수로 환산해 보면 각각 1.87 Hz, 1.68 Hz이다. 축소모델로부터 얻은 1차 모드에 대한 방향별 고유 진동수 및 감쇠비를 표 1에 정리하였다.

5.2 본실험

파괴 실험인 EC14XYZ 실험에서 모델의 벽에서 흙이 떨어지기 시작했으며 EC18XYZ 실험에서는 주춧돌 위에 놓인 기둥이 원래의 위치에서 조금씩 미끌어져 나가는 피해 형태를 보였다. EC22XYZ 실험에서는 기둥과 벽체가 분리되는 피해 형태가 뚜렷이 관찰되기 시작했으며, 지진 세기가 증가함에 따라 기둥의 미끌림이 현저하게 발생하고 벽체와 기둥 사이가 점점 더 벌어지는 양상을 보였다. EC30XYZ 실험에서 벽체를 구성하는 인방이 기둥 구멍에서 이탈되면서 벽체가 무너지는 피해가 발생하기 시작하였고 EC34XYZ 실험에서는 모든 인방이 기둥에서 이탈되어 벽체가 무너지는 피해를 보였으며 EC46XYZ에서 가옥이 완전 붕괴되었다. 입력지진 세기의 각 단계별 피해 형태를 그림 4 ~ 그림 7에 보였다.

5.3 실험 결과 분석

본 실험을 통해 관찰된 주된 파괴 형태는 입력지진의 세기가 증가함에 따라 기둥의 미끌림이 발생하게 되고 이로 인하여 기둥에 결합된 인방 부재가 이탈하게 되어 벽체, 마루 등의 구조재가 붕괴되는 형태로 진행되었다. 이는 전통 초가삼간 가옥 축소모델의 진동대 시험[7, 8]에서 관찰된 최종 파괴 형태와는 다른 양상이며, 기와집 1/2 축소모델의 지진 실험[5, 6]의 파괴 형태와 유사한 양상을 보여주었다. 입력 지진의 주파수 성분에 의한 영향을 보기 위하여 EI Centro 지진과 Whittier Narrows 지진 입력에 대한 구조물의 응답을 비교 하면 EI Centro 지진 입력의 경우에 응답이 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 예비실험 결과 x 축의 1차 고유진동수가 2.65Hz로서 EI Centro 지진의 응답 스펙트럼의 증폭구간(1.25-8.0Hz)에 해당하기 때문이다.

6. 결론

조선왕조실록에 기록된 가옥의 지진피해를 바탕으로 역사지진의 세기를 평가하고자 초가집 1/2 축소 모델을 제작하였다. 낮은 진폭에서 구조물의 동특성을 확인하기 위하여 예비 실험을 수행하였고 본 실험에서는 입력지진의 세기를 증가하면서 축소 모델의 피해상황과 거동특성 변화를 관찰하였다. 본 실험을 통해 관찰된 주된 파괴 형태는 벽체, 마루 등 구조재의 붕괴이며 기둥하단의 미끌림으로 발생한 인방 부재의 이탈이 직접적인 요인이었으며, 기와집 축소모델의 파괴 형태와 유사한 양상으로 진행되었다. 지진 실험 결과 관찰된 초가집 지진 피해 형태는 역사문헌에 기록된 초가집의 지진 피해와 비교하여 역사 문헌의 지진 피해 기록에 의존하는 역사지진 재해도 평가 시 합리적 판단 기준 자료 및 근거로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력중장기계획사업(과제명: 지진안전성 평가기반 기술개발)과 과학기술부 지원하에 국가지정연구실 사업(과제명: 제진장치를 이용한 제진 설계기술 개발)의 일환으로

수행된 것이다. 또한 이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원금 및 BK21 사업단의 지원금에 의한 것이다.

참고문헌

1. 이기화, 한반도의 역사지진자료, 지구물리, 제 1권 제1호, 1998, pp. 3-22.
2. 추교승, 한반도의 지진재해도 작성을 위한 역사피해지진의 평가 및 종합정리, 행정자치부 국립방재연구소, 1999.
3. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
4. 전봉희, 서울대학교 건축학과, 개인자문, 2002.
5. 류혁, 김재관, 전봉희, 허영철, 기와집 실물 크기 모델의 지진실험, 한국지진공학회
6. 류혁, 김재관, 전봉희, 김병현, 기와집 1/2 축소 모델의 지진 실험, 한국지진공학회 춘계 학술 발표, 2003,
7. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 암반지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 1권 4호, 1997, pp. 11-20.
8. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(II) : 연약지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 1권 4호, 1997, pp. 21-28.
9. 김재관, 류혁, 쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 동적 거동 시험, 한국지진공학회논문집, 5권 4호, 2001, pp. 51-66.

표 1. 초가집 1/2 축소 모델의 고유 진동수 및 감쇠비

	1차 모드	
	고유진동수(Hz)	감쇠비(%)
x 축 (보 방향)	2.65(1.87)*	15.9
y 축 (도리 방향)	2.38(1.68)*	15.6

() * 은 원형 모델에 대한 고유 진동수



그림 1. 초가집 원형 모델의 전경

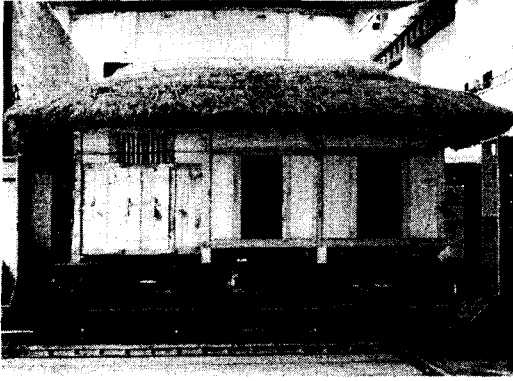


그림 2 제작 완성된 초가집 1/2 축소 모델



그림 3. 초가집 1/2 축소 모델 진동대 설치

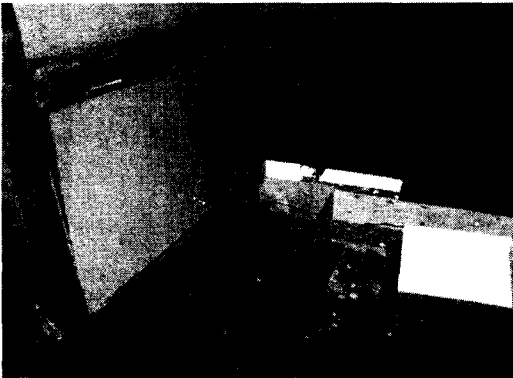


그림 4. 벽체와 기둥의 분리(EPGA=0.30g)

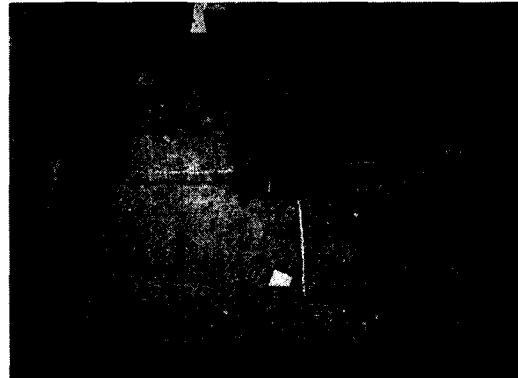


그림 5. 기둥 하단의 미끌림(EPGA=0.38g)

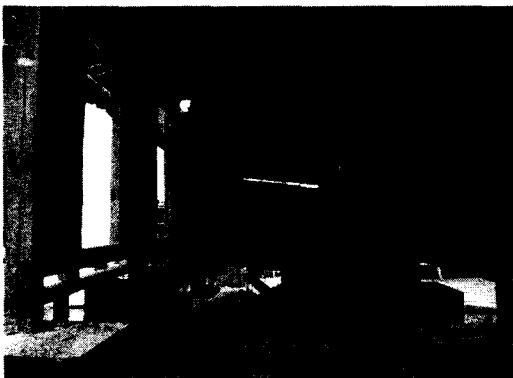


그림 6. 내부 벽체의 붕괴 (EPGA=0.42g)



그림 7. 실험모델의 완전 붕괴
(EPGA=0.46g)