

기와집 1/2 축소 모델의 지진 실험

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

류혁* 김재관** 전봉희*** 김병현****

Ryu, Hyeuk Kim, Jae Kwan Jeon, Bong Hee Kim, Byung Hyun

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 tiled 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 유사이래 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 기록된 피해상황으로부터 역사지진의 세기를 평가하는 작업은 연구자의 주관적인 평가로 인하여 높은 불확실성이 존재한다. 따라서 피해 구조물을 고증을 통하여 충실하게 복원하여 여러 가지 종류의 지반운동에 대하여 취약도 실험을 수행하고 지반운동의 세기와 피해수준과의 관계를 정량적으로 도출한다면 보다 신뢰성있는 역사지진 세기 평가를 할 수 있을 것이다.

조선시대 가옥은 크게 기와집(瓦家)과 초가집(草家)으로 나뉘는데 조선왕조실록에 기록된 가옥

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

*** 정회원 · 서울대학교 건축학과, 교수

**** 정회원 · 한국기계연구원, 책임연구원

에 해당하는 용어 중 屋宇, 屋, 人家는 초가집을, 館宇는 기와집을 뜻하며 屋舍, 家舍는 구별하지 않고 쓰였다[4]. 기와집의 경우 기록된 대부분의 피해가 기와와 관련되어 있으며 가장 큰 피해로 '기와가 날아가 떨어졌다'고 기록되어 있다. 기와집 전체의 피해 상황에 대한 기록을 살펴보면 가장 큰 피해에 대하여 '무너질 듯이 흔들렸다'고 기록되어 있으나 무너진 기록은 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 조선시대 가옥 중 기와집을 대상으로 전문가의 고증을 받아 공학적으로 대표성 있는 실험 모델을 제작하여 취약도 시험을 수행하고 이를 바탕으로 구조물의 피해수준과 역사지진 세기의 관계를 정량적으로 평가하고자 하였다. 본 연구와 동일한 성격의 연구로는 신라시대 경주에서 발생한 역사지진의 세기를 정량적으로 규명하기 위한 전통 초가삼간 가옥 축소모델의 지진응답 특성 실험[5, 6]과 1936년 쌍계사 지진의 세기를 추정하기 위한 쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델 실험[7]이 있다.

2. 기와집 1/2 축소 모델 제작

2.1 조선시대 기와집 원형 모델 고증

전문가의 자문[4]을 통하여 조선시대 기와집의 대표적인 구조를 가진 가옥으로 양평 김병호 고가(경기도 민속자료 제5호, 경기도 양평군 용문면 오촌리 181 소재)를 선정하였다. 양평 김병호 고가는 1800년대 말이나 1900년대 초에 건립된 것으로 추정되며 'ㄱ'자 평면구조의 전형적인 중부지방의 한옥 유형을 간직하고 있다. 또한 가옥의 구조, 형태 및 각 구조부재의 크기와 단면이 실측을 통해 상세히 조사[8]되었으므로 모델 제작 시 원형에 충실한 제작이 가능한 이점이 있다.

2.2 기와집 1/2 축소 모델 설계

김병호 고가의 경우 전체 구조를 대상으로 축소를 하게 되면 축소율이 너무 작게 되어 제작이 어렵고 지진 하중에 저항하는 기와집의 구조를 충분히 재현하지 못하게 되므로 본 연구에서는 제작 가능한 축소율을 고려하여 기와집의 대표적 공간인 방과 마루를 포함한 두 칸을 실험 모델의 원형으로 정하였다(그림 1).

기와집 2칸 원형 모델의 크기(4.8m*3.7m)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 사용하였으며 기둥이 받는 하중을 고려하여 두 칸의 양 옆 반 칸에 해당하는 무게를 부가 하중으로 추가하였다. 인공질량 모델 방법의 무게에 대한 축소율은 1/4이나 실제로 제작되는 축소 모델의 무게는 1/8이 되어 추가로 인공질량이 필요하게 된다. 이를 기와집 두 칸 1/2 축소 모델에 적용하여 부가하중을 계산하면 총 3.8ton이 되며 부가 하중은 납피를 사용하여 지붕에 등분포 시켰다

2.3 기와집 1/2 축소 모델 제작

기와집 축소 모델을 진동대 위에 설치하기 위하여 바닥 프레임을 제작하였고 기둥이 놓일 위치에 주춧돌을 부착하였다. 목조 재료는 강원도에서 채취한 육송을 사용하였고 기와는 현재 남아있는 고가옥의 기와를 사용하였다. 기와집 모델의 제작은 원목을 치수에 맞게 절단하여 부재들을 제작하고 제작된 부재들을 설계도면에 따라 조립하는 순서로 이루어졌다. 바닥 프레임에 고정된 주춧돌 위에 기둥, 도리 그리고 보 부재를 접합시켜서 쌓아 올렸고 지붕은 연목을 사용하여 구성하

였다. 목조 프레임으로 기와집의 형상을 갖춘 후 지붕에 적심목을 깔고 납피를 사용하여 부가 하중을 설치하였다. 그 후 지붕에 흙채움을 하여 기와를 얹기에 좋은 평평한 상태로 만든 다음 암기 와를 먼저 얹고 숫기와를 홍두개 흙으로 채워 얹은 후 마지막으로 용마루를 쌓았다. 벽체는 먼저 가는 목재를 가로 세로로 새끼줄로 얹히게 하여 흙이 잘 부착되도록 만든 후 짚을 섞은 흙을 사용하여 흙채움을 하였고 건조시킨 후 고운 흙으로 미장을 하고 그 위에 강회로 마무리를 하였다. 그림 2는 기와집 두 칸 1/2 축소 모델의 최종 완성된 모습이다.

3. 실험 장치와 Data 획득 시스템

실험은 한국기계연구원이 보유한 30톤 용량의 6자유도 진동대에서 실시되었다. 제작된 축소 모델은 그림 3과 같이 진동대에 탑재하였다. 기와집 축소 모델은 보 방향과 도리 방향에 대하여 다른 동적 응답 특성을 보일 것으로 판단되어서 x 축은 단축 보 방향, y 축은 장축 도리 방향으로 평면 직교 좌표계를 설정하고 기와집 축소 모델의 파괴 실험시 발생하는 모델의 응답은 변위계(LVDT), 가속도계(Accelerometer), 각속도계(Angular Rate Sensor)를 이용하여 측정하였다. 측정된 신호는 HBM(Hottinger Baldwin Messtechnik)사의 MGC Plus를 사용하여 200Hz의 sampling rate으로 저장하였다.

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 각 방향별로 개별적으로 백색잡음(White Noise)파를 가진하였다. 이때 백색잡음파의 주파수 범위는 0.0-30.0 Hz이며 최대 진폭은 0.04g이다.

4.2 본실험(Fragility Test)

입력지진의 세기와 기와집의 피해수준의 관계를 실험을 통하여 정량적으로 도출하기 위하여 지반운동세기를 순차적으로 증가시키면서 기와집 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.

파괴실험에 앞서 El Centro 지진과 Whittier Narrows 지진을 모델의 x 축 방향에 대하여 낮은 지진세기로 입력하여 입력 지진의 주파수 성분에 따른 모델의 거동 특성을 관찰하였으며, 파괴 실험에서는 상대적으로 넓은 주파수 성분을 가지고 있는 El Centro 지진을 모델의 x 축 방향과 z 축 방향으로 동시에 입력하여 지반운동세기와 기와집의 피해 수준 관계를 도출하였다. 이때 입력 지진운동의 세기는 유효지반가속도(EPGA; Effective Peak Ground Acceleration) 개념을 도입하여 크기를 정의하였다.

5. 실험 결과

5.1 예비시험

모델에 부착한 가속도계에서 계측된 응답 가속도 신호의 푸리에 스펙트럼과 입력 가속도 신호의 푸리에 스펙트럼의 비를 계산하여 전달함수를 구하고 이를 이용하여 모델의 고유 진동수와 모

드 형상을 구하였다. 그림 4는 x 축, y 축의 1차 모드 형상이며 수평 x , y 두 축에 대한 각 모드의 고유 진동수와 감쇠비를 표 1에 정리하였다. 이때 고유 진동수는 상사율을 적용하여 원형 모델의 진동수로 변환한 값이고, 감쇠비는 Half Power Band Width 방법을 사용하여 계산하였다. 전체적으로 1차 모드가 수평 두 축 모두에 대하여 지배적인 형상이었으며, y 축(도리 방향)이 x 축(보 방향) 보다 더 유연한 것을 알 수 있다.

5.2 본실험

El Centro 지진을 모델의 x 축, z 축 방향으로 동시에 입력한 파괴 실험에서는 EC16XZ 실험에서 모델의 벽에서 흙이 떨어지며 주춧돌 위에 놓인 기둥이 원래의 위치에서 조금씩 미끌어져 나가는 피해 형태를 보였다. EC20XZ 실험에서 벽체에 균열이 발생하고 기둥과 벽체가 분리되는 피해 형태를 보이며 지진세기가 증가함에 따라 기둥의 미끌림이 현저하게 발생하여 벽체의 기둥 사이가 점점 벌어졌다. EC24XZ 실험에서 벽체를 구성하는 인방이 기둥 구멍에서 빠지는 피해가 발생하였고 EC36XZ 실험에서 마침내 벽체가 무너지는 피해 양상(그림 5)을 보였다.

5.3 실험 결과 분석

본 실험을 통해 관찰된 주된 파괴 형태는 지진 입력 하중이 늘어남에 따라 기둥의 미끌림이 발생하게 되고 이로 인하여 기둥에 결합된 인방 부재가 이탈하게 되어 벽체, 마루 등의 구조재가 붕괴되는 형태로 전통 초가삼간 가옥 축소모델의 진동대 시험[4, 5]에서 관찰된 최종 파괴 형태와는 다른 양상을 보였다. 그리고 수평 한 방향 입력과 수평, 수직 두 방향 입력에 대한 구조물의 응답을 비교하였을 때 낮은 지진 세기 입력의 경우 입력 지진의 수직 성분의 영향은 미미했다. 다만 지진 세기가 증가하면 기둥 하단의 미끌림이 크게 발생하므로 기둥 하단의 마찰과 관련하여 수직 방향의 지진 입력이 어느 정도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 고주 정상부와 지붕의 용마루 기와에서 측정한 수평 방향과 수직 방향의 응답 가속도를 비교했을 때 지붕 가구 구조와 기와에 의한 증폭을 확인 할 수 있었으나 역사 문헌에 기록된 기와의 추락과 같은 형태의 피해는 관찰되지 않았다.

6. 결론

조선왕조실록에 기록된 가옥의 지진피해를 바탕으로 역사지진의 세기를 평가하고자 기와집 두 칸 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 기둥 하단의 미끌림으로 발생한 인방 부재의 이탈이 직접적인 요인이었다. 지진 실험 결과 관찰된 기와집 지진 피해 형태는 역사문헌에 기록된 기와집의 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 원자력증장기계획사업(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. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 암반지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 1권 4호, 1997, pp. 11-20.
6. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(Ⅱ) ; 연약지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 1권 4호, 1997, pp. 21-28.
7. 김재관, 류혁, 쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 동적 거동 시험, 한국지진공학회논문집, 5권 4호, 2001, pp. 51-66.
8. 경기도, 경기도 지정문화재 실측조사보고서, 1997.

표 1. 축소 모델 고유 진동수 및 감쇠비

	1차 모드		2차 모드	
	고유진동수 (Hz)	감쇠비(%)	고유진동수 (Hz)	감쇠비(%)
x 축 (보 방향)	1.72	13.24	14.03	1.36
y 축 (도리 방향)	1.53	14.03	15.60	0.98

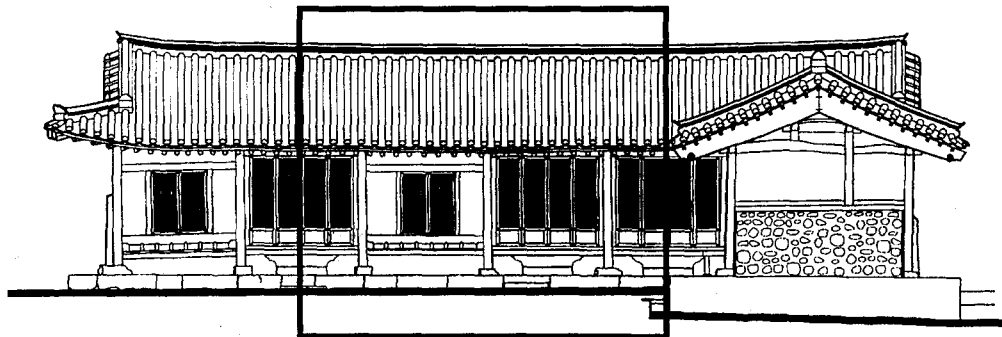


그림 1. 기와집 두 칸 1/2 축소 모델 원형

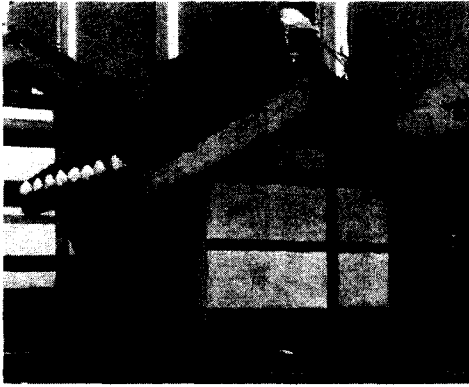


그림 2. 제작된 두 칸 축소 모델

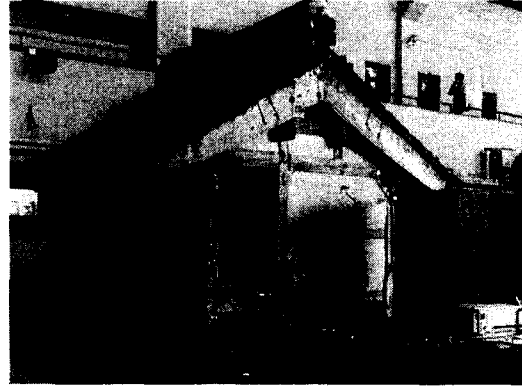
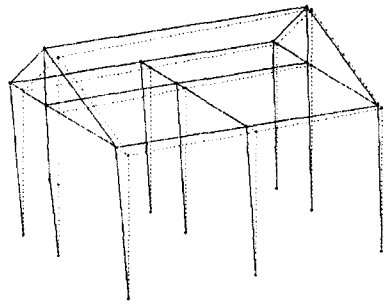
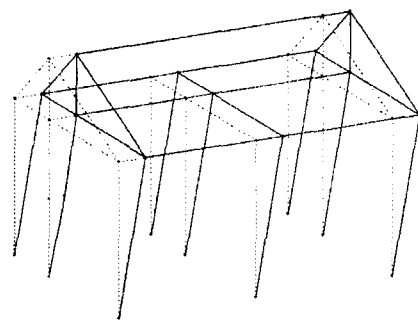


그림 3. 기와집 1/2 축소 모델 진동대 설치



(a) x 축 모드 형상



(b) y 축 모드 형상

그림 4. 축소 모델 모드 형상

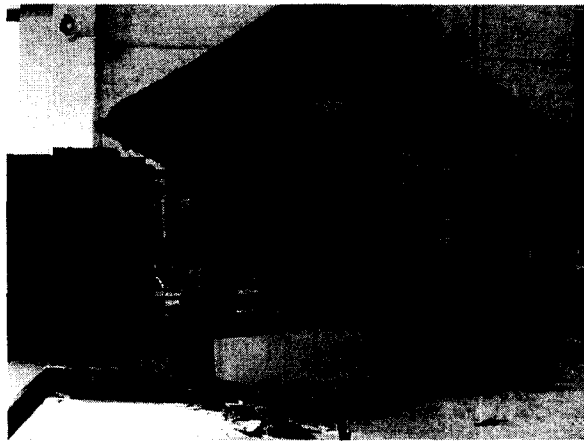


그림 5. 축소 모델 피해 - 벽체 붕괴(EC36XZ)