

수평하중에 대한 목조프레임의 결구공법에 대한 연구
- 鳳停寺 極樂殿을 대상으로 -
Constructibility Characteristic of Wood Frames of Lateral
Cyclic Load
- Geungnakjeon Hall of Bongjeongsa Temple -

이호*, 이택운**
Ho Lee*, Taick-Oun Lee**

<Abstract>

The main purpose of this study is to figure out of seismic structural behaviour of Gukrakjeon of Bongjung- Temple which is the oldest wooden architecture in Korea , and to evaluate in engineering aspect of seismic records. The non-linear analysis is essential for accurate evaluation of wooden architecture in seismic behaviour. Based on the experimental test with applying cycle forces in joint specimens is focusing on not only to prove the structural characteristics, but also to evaluate damping ratio, As the result of this test, damping ratio is affected not the joint methods but the frame variations. The average damping ratio was 26%.

Keywords : Seismic constructibility behaviour, Bongjung-Temple, Wooden architecture, Damping ratio

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 의의

우리나라에서는 오래전부터 목재를 이용한 건축물을 많이 지어 왔다. 이러한 건축물이 시공되던 시기에는 일정한 구조적 규준이나 시공지침이 제정되어 있지 않아서 도편수의 경험에 의존하여 지어진 것이 일반적이다. 한국목조 건축에 대한 지금까지의 연구는 주로 의장요소

별 기법과 특성, 그리고 그 시대적 변천과정에 대한 규명에 치우쳐왔다. 또한 한국 전통 목조 건축은 역사의 흔적으로만 남아 있는 실정이며, 노후화 현상과 성능 저하 현상으로 보수 및 보강이 필요한 상태이다. 그중에서도 지진 재해도는 강진기록이 전무하기 때문에 대부분 역사지진 기록에 의존하여 산출된다. 따라서 역사지진 평가상의 불확실성을 저감하여 지진재해도의 신뢰성을 향상시키는 노력은 매우 중요하다.

* 정회원, 교신저자 상주대학교 건축공학부 교수, 工博
E-mail : holee@sangju.ac.kr

** 정회원, 영남이공대학 건축과 조교수, 工博

* Corresponding Author, Prof., Dept. of Architecture, Sangju National University, Ph.D.

** Prof., Dept. of Architecture, Yeungnam College of Science, Ph.D.

본 연구는 현존하는 가장 오래된 목조물인 봉정사 극락전을 대상으로 목조 건축의 파괴에 관한 역사지진 기록을 공학적 측면에서 평가하여 해당 역사지진의 크기를 정략적으로 재평가하기 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 봉정사 극락전(1369년, 국보 15호)은 우리나라에서 현존하는 최고의 목조건축이라는 점에서 역사적 가치를 지니고 있다. 또한 근래의 완전 해체보수와 실측조사를 통해 비교적 정확한 부재치수와 결구공법이 확인되었다. 지진 시 목조 건축의 거동을 정확히 평가하기 위해서는 비선형해석이 필수적이다. 이를 위해서는 목조 프레임의 이력특성, 감쇠비 등을 평가하여 하나 우리나라의 경우 이들의 연구가 현재까지 전무한 실정이다. 본 논문에서는 봉정사 극락전의 축소 실험체에 대한 실험을 통하여 수평 교번하중이 작용할 때의 이력특성 및 등가 점성 감쇠비를 평가하였다.

1.2 기존연구검토와 연구의 방법

전통목구조의 구조 원리를 규명하려는 연구는 몇몇 건축사학자들과 기술자를 중심으로 이루어져왔다. 관련 대표 연구내용을 소개하면 전통목구조에 관한 해석적 연구(김봉건, 서울대학교 석사학위논문, 1985년), 고대 민가의 구조 및 목조 프레임의 수평내력에 관한 연구(서정문의 5인, 한국지진공학회 논문집, 1997년), 수평교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성평가(서정문의 4인, 한국지진공학회 논문집, 1997년), 등을 들 수 있다. 그러나 기존연구의 문제점은 기초 자료와 선행연구 부족으로 해석결과에 대한 공학적 보완과 수정의 여지가 적지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 봉정사 극락전 결구공법의 건축사적 가치를 정확히 규명하기 위하여 실험을 통하여 이음의 구조적 성능을 살펴보고자 한다.

1.3 봉정사 극락전의 가구와 결구특성¹⁾

(1)가구 구성

봉정사 극락전의 구조적 측면에서의 결구특성¹⁾ 및 결구방법은 이상해 등이 연구한 봉정사 극락전의 목조 결구방법에 관한 연구에 상세히 나타나 있다.

봉정사 극락전의 평면은 정면 3칸과 측면 4칸이고, 가구는 7량이며, 지붕은 맞배지붕이다. 기

둥은 중 고주와 고주, 평주와 우주로 구성되어 있다. 몸체부분은 기둥과 하인방 및 창방으로 구성되어 있는데, 하인방은 정면과 배면 평주와 좌, 우측 박공면의 중 고주 및 고주의 하부를 연결한다. 창방은 평주와 중 고주의 상부를 잡아 주고 있다. 정면과 배면 평주 상부의 창방은 기둥을 횡 방향으로 연결하고 있다. 정면과 배면 평주와 중 고주 위에는 포작이 있는데, 중 고주와 평주의 높이 차이로 인하여 포작의 제공 수가 다르다. 정면과 배면 평주 위의 포작 제공은 2제공이고, 중 고주 위는 1제공이다. 포작 위 대량은 단일부재로 정면 평주와 내부 중 고주 및 배면 평주 위에 걸쳐 있다. 대량의 단면 크기는 위치에 따라 다른데, 정면 주심도리와 외목도리 부분, 배면 하중도리와 외목도리 사이는 수장재 폭에 가깝다. 그리고 좌, 우측 박공면의 전, 후 중 고주 위의 하중도리와 우주 위의 외목도리 사이의 보 단면 크기는 수장재 폭에 가깝다. 종량은 전, 후 계량 위에 있으며, 종량 위에는 복화반을 놓아 중도리 위의 하중을 종량에 전달하고 있다. 중도리와 상중도리, 상중도리와 하중도리, 하중도리와 주심도리 사이에는 사장재인 솟을재가 있다. 극락전의 가구는 대량의 한 켜, 계량의 한 켜, 종량의 한 켜가 적층개념으로 구성되어 있다. 박공면의 포작 및 가구는 전, 후 중 고주와 중앙의 고주의 높이 차이로 인하여 대량과 종량의 가구구성이 정 칸과는 다른 모습을 보인다. 따라서 박공면의 가구는 정 칸과는 달리 중 고주와 고주가 만나 결구하는 특징을 보인다. 박공면의 대량은 전, 후 평주와 고주를 연결하는데, 단일부재가 아닌 2개의 대량이 고주에서 맞보형식으로 결구되어 있다. 대량머리는 평주 위 포작과 결구하고 보 뒤초리는 고주와 연결된다. 계량부분의 결구방법은 정 칸 좌, 우와 박공면의 구성방법이 같다.

(2)결구특성

봉정사 극락전의 결구를 기둥부분, 포작부분, 가구부분으로 나누어 수평부재와 수직부재인 기둥과 인방재간, 포부재간, 가구의 기둥과 보의 맞춤과 이음의 연결방법에 의한 결구 특성을 정리하면 다음과 같다. 한국 전통목조건물의 수직부재인 기둥과 수평부재인 창방 또는 인방재의 결구는 건물의 몸체를 구성하는데 중요한 역할을 한다. 기둥과 창방의 결구는 긴밀한 결

속력을 지속적으로 유지하는 것이 중요하다. 봉정사 극락전의 기둥 상부의 평주는 창방과 통장부맞춤을 하고 우주는 사개맞춤을 한다. 평주 위의 창방은 서로 이음을, 우주 위의 창방은 맞춤을 하고 있다. 기둥과 창방의 결구는 기둥의 주열, 특히 상부의 주열을 일정하게 유지하는데 있다. 즉 평주 상부의 결구는 건립할 때 기둥 상부의 주열 선을 지속적으로 유지하는데, 우주 상부 결구는 우주를 중심으로 건물의 직각 틀을 유지하는데 중요한 역할을 한다. 기둥 상부의 결구 목부재는 시간의 경과에 따라 조립초기의 모습과 달리 목재라는 재료의 특성과 주변 상황에 따라 변형이 생긴다. 특히 기둥 상부의 횡단면 할렬과 창방의 수축으로 기둥과 창방 간 틈이 생긴다. 따라서 결구는 건물의 응력 및 목재의 변형과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 봉정사 극락전의 포작부분은 수평 포작간, 포작과 보부재의 반턱이음으로 결구되어 있다. 이 경우 기둥을 중심으로 도리방향의 부재가 받을장이고, 보방향의 포부재인 살미 또는 보부재가 업을장인 것이 일반적인 모습이다. 보방향의 포부재는 상부의 하중이 보를 통하여 직접 전달되며, 도리방향의 포부재는 보방향 부재보다도 하중을 간접적으로 받는다. 포작에 하중이 일률적으로 전달되지 않을 때, 특히 받을장 부재가 직접 하중을 받을 때 반턱을 견어내지 않은 부분에 응력으로 인한 갈라짐이 발생된다. 따라서 지붕의 하중이나 기타 외부의 힘을 직접 받는 포부재는 업을장으로 처리 하는 것이 일반적이다. 특히 봉정사 극락전은 수장폭의 보와 단장혀, 외목도리가 결구된 특징을 보여주고 있다. 직접하중을 받는 보방향의 상,하초제공과 이제공의 결구방법이 다르다. 초제공은 소로를 통하여 연결된 반면 이제공은 상부부재와 밀착하여 연결된 결구 특징을 보여주고 있다. 수직부재인 기둥과 수평 가구재인 보의 결구는 압축력보다는 횡하중과 밀접한 관계가 있는데, 중층건물이나 맞배지붕의 박공면에 나타난다. 극락전의 정칸 좌,우측면의 대량은 포작과 연결되어 있고, 좌,우측 박공면은 중고주, 고주 및 포작과 연결되어 있다. 좌,우측 박공면의 보머라부분은 포작과 연결되어 있고 보 뒤초리는 고주와 연결되어 있다. 기둥과 보 뒤초리 결구는 박공면의 가구들을 유지하는데 중요한 요소로 작용한다. 봉정사 극락전은 보의

뒤초리가 고주와 연결되어 있다. 극락전의 수평재 보는 수직재 기둥과 장부맞춤을 하고 보강재를 사용하지 않는 결구상의 특징을 보여주고 있다. 보를 기둥에 장부맞춤을 하고 보강재 산지를 막는 결구방법은 보가 기둥에서 이탈되는 것을 막기 위한 것으로 봉정사 극락전에서는 보이지 않는다. 전통목조건축물의 부재들 결구는 단순히 부재와 부재를 연결하여 짜인 것이 아니라 구조적인 측면에서 건물의 변형이 발생하였을 경우 중요한 구조적 역할을 한다.

1.4 극락전의 기둥 결구방법¹⁾

(1) 기둥의 하인방

봉정사 극락전의 기둥은 정면과 배면의 평주와 우주, 좌, 우측 박공면의 중 고주와 고주가 있다. 정면과 배면의 기둥은 4개의 평주와 4개의 우주, 중 고주는 박공면의 중 고주 4개와 내부 불단 뒤 중 고주 2개로 총 6개이고, 고주는 박공면에 각 1개로 총 2개이다. 이들 기둥의 하부는 하인방이, 상부는 창방이 각각 상, 하를 잡아주고 있다. 기둥과 하인방은 통장부맞춤과 쌍장부맞춤, 주먹장쌍장부맞춤에 의하여 결구되어 있다. 정면과 배면의 평주와 우주는 하인방이 통장부맞춤과 쌍장부맞춤으로 결구되어 있다. 다양한 결구방법은 여러 차례의 수리를 통하여 나타난 결과로 본다. 시공이나 치목의 편의로 볼 때, 통장부맞춤을 하는 것이 가장 용이하다고 보며, 다음으로 쌍장부맞춤, 주먹장쌍장부맞춤 순이다. 구조적인 측면을 고려하면, 주먹장쌍장부맞춤에 의한 결구방법은 쌍장부맞춤이나 통장부맞춤보다는 구조적인 안정성이 높고, 측압에 의한 기둥 하부의 변형에 대한 구조적 안정감을 갖고 있다. 기둥과 하인방의 결구방법은 좌, 우측면의 중 고주 하부의 결속력을 높이고 안정적인 결구 모습을 보여주는 것으로 판단된다.

(2) 기둥과 창방

창방은 정면과 배면 평주와 우주, 박공면 우주와 중 고주와 고주, 그리고 내부 중 고주와 박공면의 후면 중 고주와 맞춤과 이음에 의해 결구되어 있다. 평주는 기둥상부는 창방과 기둥이 통장부 맞춤을 하고, 창방과 창방이 반턱주먹장이음을 한다. 기둥과 창방의 결구가 통장부 맞춤으로 이루어져 기둥과 창방의 결구는 목재의

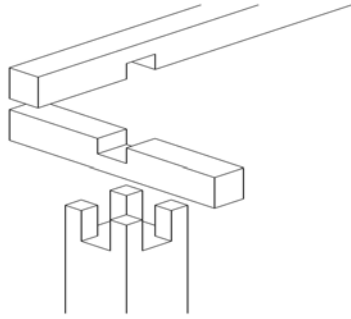


Fig. 3. 반턱맞춤.

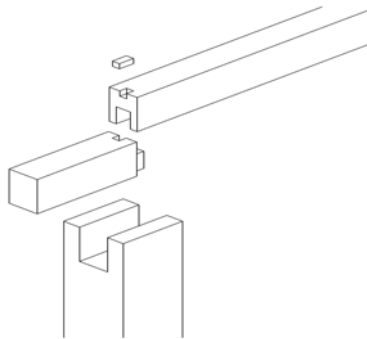
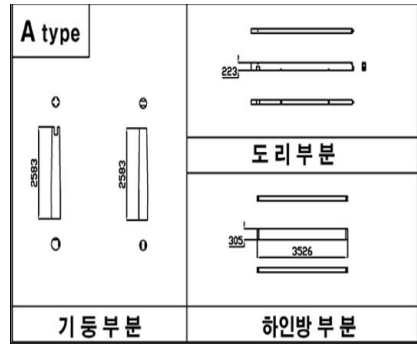
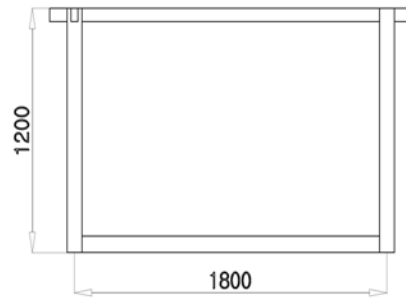


Fig. 4. 반턱이음.



(1) A Type

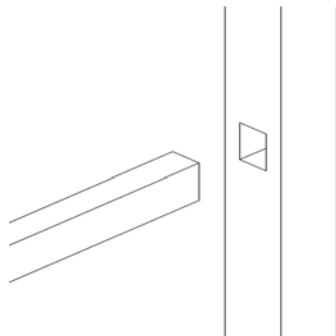


Fig. 5. 통맞춤.

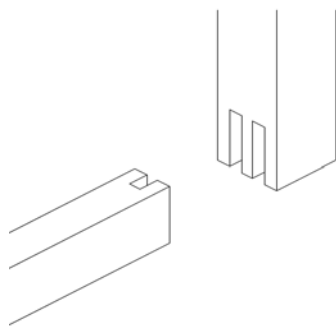
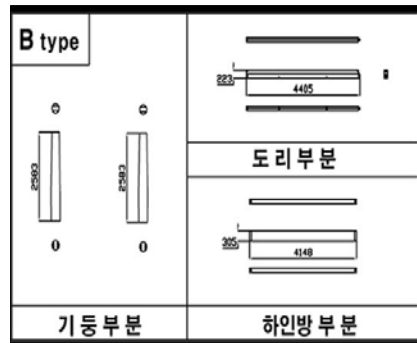
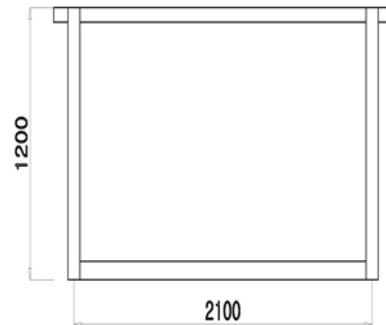


Fig. 6. 쌍장부 맞춤.



(2) B Type

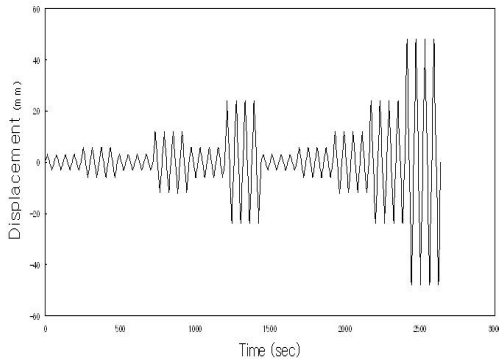


Fig. 9. Time - Displacement History.

3. 연구 결과 및 분석

A, B, C, D타입의 실험체의 이력실험결과는 모두 비슷한 양상을 띠고 있으므로 평균을 내어서 이력곡선 그래프로 제작 하였다. 이처럼 평균 하중-변위 이력곡선에서는 매우 큰 비선형성을 나타낸다.

이는 못을 사용한 프레임이나 서재로 보강된 프레임의 이력곡선 등과는 그 형태가 매우 다르다.

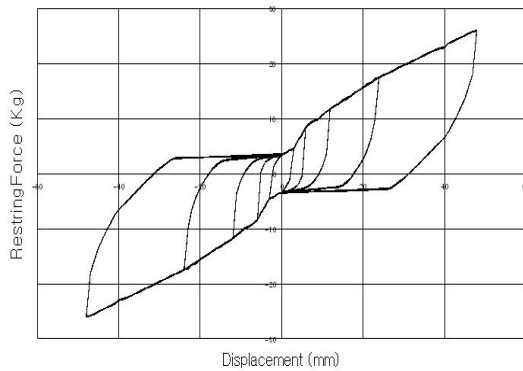


Fig. 10. Average Force-Displacement Cycle.

Table 3 및 Fig 10에서 변위가 증가함에 따라 강성이 저하됨을 알 수 있다. 그리고 동일한 크기의 변위에 대한 이력에서 각 Cycle의 씨컨트 강성(Secant Stiffness)이 증가 또는 감소하는 불규칙한 경향을 보여 주고 있다. 이력곡선으로부터 이력당의 일량과 에너지 소비량과의 관계를 이용한 아래의 식으로부터 프레임의 등가 점성감쇠비(Heq)를 산출하였다.

Table 3. The Average Secant Stiffness of loading cycles

구분	±0.5dc	±1.0dc	±2.0dc	±4.0dc	±8.0dc
Cycle1	1.5197	1.3876	0.9815	0.7282	0.5416
Cycle2	1.5597	1.4076	0.9915	0.7332	0.5441
Cycle3	1.4864	1.3710	0.9731	0.7240	0.5395
Cycle4	1.5131	1.3843	0.9798	0.7273	0.5411

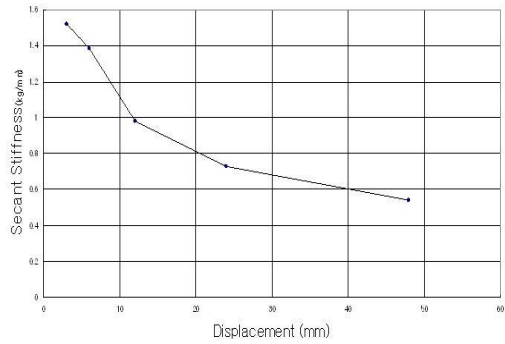


Fig. 10. The Average Secant Stiffness Variation.

$$H_{eg} = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot P_{max} \cdot X(P_{max})}$$

Table 4. The Ratio of Damper

변위량 \ 기호	ΔW	P _{max}	X(P _{max})
±0.5dc	29.7606	4.5592	3
±1.0dc	85.3658	8.3258	6
±2.0dc	225.902	11.7776	12
±4.0dc	611.266	17.3241	24
±8.0dc	1642.45	25.4945	48

이식을 이용하여 각 재하단계에서의 등가 점성 감쇠비를 계산한 결과 최종 점성감쇠비가 약 26%로서 비교적 큰 값을 나타내고 있다. 이는 본 시험체들이 끼워 맞춘 형태로 되어 있어 유연성이 크며, 연결부에서의 조임과 마찰 등에 의해 감쇠가 크게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 현재 존재하는 가장 오래된 목구조물인 봉정사 극락전을 대상으로 수평하중에 대한 목조프레임의 결구공법에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 목구조의 접합 방식의 차이는 이력 특성 실험에서는 큰 차이가 없었고 프레임의 차이에 따라 달라진다.
- (2) 전 시험체에 걸쳐 실험 결과 큰 비선형을 나타내며 변위가 증가함에 따라 강성이 감소하는 경향을 보인다. 재하 사이클의 증가에 따라 씨컨트강성이 증가 또는 감소하는 불규칙한 경향을 보인다.
- (3) 목구조의 경우 결구 방식에 차이에 따른 차이는 미미하며, 평균 등가 점성감쇠비는 26%로 비교적 큰 값을 보였다.

지진재해도의 불확실성 저감 및 현존하는 많은 사찰 및 고건축에 대한 신뢰성 있는 내진성평가를 위해서는 추후 가구 프레임의 종류 및 형태, 노후도, 숙련도, 하중 재하속도 등의 변수를 고려한, 다양한 실험을 수행하여 데이터를 확보함으로써 현존하는 문화재를 보존 하거나 보수 시에 실질적인 도움이 되기를 기대한다.

후 기

이 논문은 상주대학교 2007학년도 학술연구지원금에 의해 연구되었음

참 고 문 헌

- 1) 정연상, 이상해, “봉정사 극락전의 목조 결구 방법에 관한 연구”, 대한 건축학회 논문집 22권 4호 2006년
- 2) 윤재신, 윤용집, 강선혜. “봉정사 극락전의 구조해석을 통한 가구분석에 관한 연구 I” 대한 건축학회 논문집 20권 9호 2004년
- 3) 윤용집, “봉정사 극락전의 가구분석에 관한 연구 II”, 대한 건축학회 논문집 22권 4호 2006년
- 4) 서정문 외3, “수평 교변하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력 특성 평가”, 한국 지진공학회 논문집 제1권 제 3호 1997년
- 5) 김도경, “봉정사 극락전 평면 가구 계획에 관한 연구”, 대한 건축학회 논문집 제 17권 5호 2003년
- 6) 한재수, 김창준 “전통 목조 건축 구조해석과 현대화를 위한 장부접합의 구조적 성능에 관한 연구”, 대한 건축학회 논문집 21권 4호 2005년
- 7) 문화재 연구소, “봉정사 극락전 수리공사 보고서” 문화재 관리국 1992년
- 8) 송정목, 박학길, “보 이음부의 휨 저항성능 향상을 통한 전통 목구조 시스템 개선”, 대한 건축학회 논문집 22권 1호 2006년

(2007년 9월 23일 접수, 2007년 11월 23일 채택)