

수직 하중에 따른 목재 짜맞춤 접합부의 강성도 평가

박 천 영¹, 이 전 제², 김 광 철^{†,1}

¹전북대학교 주거환경학과, ²서울대학교 산림과학부

Evaluation of Stiffness Ratio of Wooden Mortise and Tenon Joint on Vertical Loading

Chun-Young Park¹, Jun-Jae Lee², Gwang-Chul Kim^{†,1}

¹Department of Housing Environmental Design, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

²Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract: Recently, interest in wooden construction have been growing by increasing needs and demands for eco-friendly and traditional wooden building(Hanok). Especially, Hanok has the technical development in manufacturing the mortise-tenon joint without fasteners(precut), so it could be called to modernization, industrialization and popularization. But the structural design and analysis of the structure were not regulated and had the difficulty to consider the variation of wooden member and to conduct the difficulty in the structural analysis and the design of the joint. In this study, the stiffness ratio of wooden mortise and tenon joint was evaluated according to the vertical loading, lintel and loading speed. The joint was distinguished in semi-rigid joint regardless of their factors. The stiffness ratio was 0.40 in vertical loading, 0.50 without vertical loading and 0.44 in horizontal loading with high speed. This study would be utilized to the structural analysis and design with structural analysis and design program.

Keywords: hanok, mortise and tenon joint, stiffness ratio, semi-rigid joint

1. 서 론

1990년대 목조 주택은 허가 동수가 매년 300동-500동으로 매우 미비하였으나 2001년 1,252동, 2006년 5,654동 그리고 2008년에는 10,184동(국토해양부)으로 매우 빠른 성장 추이를 나타내고 있다. 이러한 경향은 최근의 경기 침체에도 불구하고 목조 주택 시장의 꾸준한 성장은 주목할 만한 흐름이다. 특히, 2000년대 이후 급격히 증가한 한

옥에 대한 관심이 이러한 목조 건축 시장을 주도하고 있다. 최근의 한옥에 대한 재조명은 단순히 문화재로서의 한옥의 건축이 아니라 주거용으로 한옥을 활용하고자 하는 사회적 분위기이다. 이는 북촌과 각 지역의 한옥 마을, 한옥 아파트 등의 형태로 나타나고 있다. 그러나 이러한 한옥 대중화를 위해 해결해야 할 몇 가지 문제점들이 있다. 건축비 절감과 공사 기간의 단축을 위한 공장 가공 기술의 개발과 주거 성능의 향상을 위한 차음과 단열 문제의 해결, 현대인의 주거 생활을 고려한 표준 설계안의 개발, 사용 중 재료의 변형과 안정성 확보를 위한 건조재 사용과 공학 목재의 활용 등

2012년 6월 5일 접수; 2012년 6월 29일 수정; 2012년 7월 9일 게재확정

[†] 교신저자 : 김 광 철 (gckim@jbnu.ac.kr)

이다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 구조적 안정성을 확보하기 위한 구조 해석 및 설계기술 확보가 시급하다고 할 수 있다. 재료의 물성 변이가 거의 없는 타 재료에 비해 목재의 경우 재료의 비균질성과 방향성, 그리고 무엇보다도 부재 간의 짜맞춤 접합부로 구성됨에 따른 접합부 해석의 어려움이 구조 설계와 해석에 있어 큰 과제이다.

접합부는 일반적으로 강접합과 핀접합으로 분류된다. 그러나 목재 짜맞춤 접합부의 경우 부재와 부재가 서로 맞물려 접합부가 구성되므로 강접합과 핀접합이 아닌 그 사이의 중간형태로 거동하게 된다(권민호 외 2002; 김대성 외 2001; 이기학 외 2007). 강접합의 경우 지진 하중과 같은 수평하중 등에 의해 접합부의 취성 파괴가 발생할 수 있고 건물의 전체 붕괴로 이어질 수 있으며, 핀 접합의 경우 모멘트를 전달하지 못하므로 구조적 효율성을 기대하기 어렵다(장미 등 2001). 그러나 목재 짜맞춤 접합부의 경우 이 두 가지 성질을 모두 만족한다. 철골 구조의 경우 반강접합부를 인위적으로 만들어 적용하기 위한 연구들이 꾸준히 진행되어 왔으나, 목구조의 경우 이에 대한 재료의 비균질성과 방향성으로 인해 매우 제한적이었다. 이러한 반강접합(Semi-rigid Connection)은 AISC나 Eurocode 3 등을 통해 정의되고 해석과 설계에 사용되어지고 있다. 짜맞춤 접합부와 같이 반강성 접합부로 구성된 기둥-보 형태의 한옥 건축의 경우 설계와 해석에 있어 많은 제약이 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 일반적인 한옥 건축에서 사용되는 주먹장 접합부에 대하여 실제 지붕 하중을 고려한 반강성도를 실험적으로 평가하고 관련 기준을 적용함으로써 한옥 대중화와 안정성을 확보하기 위한 토대를 만들고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에서 사용한 재료는 재료 변이를 최소화하기 위하여 국산 낙엽송으로 제조된 집성재를 사용하였으며, 층재(Laminations)의 함수율은 12%

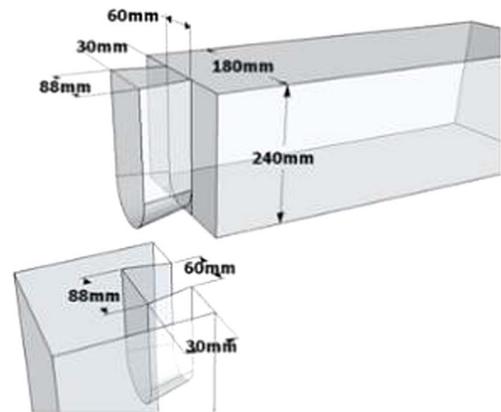


Fig. 1. Detail dimension of joint with mortise and tenon.

이하로 건조하였고, 집성재 등급은 10S30B였다. 접합부 구성을 위한 골조의 기둥과 보, 인방의 치수는 각각 $180 \times 180 \times 2400$ (mm), $180 \times 240 \times 3420$ (mm), $180 \times 180 \times 3420$ (mm)이다.

접합부의 가공은 컴퓨터 프로그램을 사용하여 도면을 그리고 목재 자동 기계를 이용하여 공장가공을 하였으며(Pre-cut machine, K2), 세부 치수는 Fig. 1과 같다. 수평 하중의 가력은 KS F 2154와 기존 문헌을 참고로 하여 정부(±) 하중을 변형각을 기준으로 반복 하중 프로토콜(Protocol)을 설정하여 각 3반복이 되도록 하였으며, 마지막 사이클은 시험기의 최대 변형 한도까지 진행하였다. 또한, 구조 해석은 완전탄소성 모델(AIJ 2006)을 기초로 에너지 소산력과 반강성도를 평가하였다. 수직 하중은 일반적인 한옥 모델을 선정한 후(한옥 시공 매뉴얼 표준 설계 도서 내 A-1 모델 2006 전라남도), KBC 2009의 하중 기준에 따라 계산하였으며 그 값은 10476 (N/m)이다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 수직 하중의 평가

목재 짜맞춤 접합부에 가해지는 수직하중은 주로 지붕 하중에 의해 발생한다. 본 연구에서 수직 하중을 결정하기 위하여 대상 건축물을 한옥 마을의 보급형 주거 건물 용도로 개발된 한옥 시공 매뉴얼 표준 설계 도서(2006 전라남도) 내 수록된

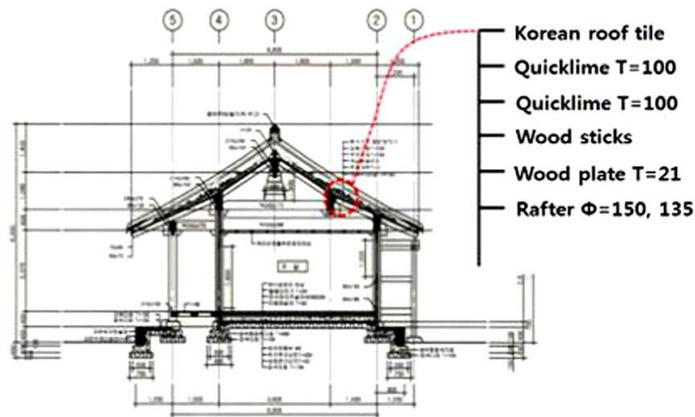


Fig. 2. Longitudinal section and composition of roof for the hanok.

Table 1. Roof weight table (KBC 2009)

| Figure | Material (Length Unit : mm) | Unit Weight (N/mm ²) | Spacing (mm) | Weight per roof 1 m ² (N) | |
|--------|--|-------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------|
| | | | | Weight | Total |
| | • Clay roof tile (with Joint soil) | 4.7 | | 48 | |
| | • Base plate (strip flooring 15 × 100) | 0.8 | 450 | 8 | 578 (588) |
| | • Rafter | 0.1 | | 3.1 | |
| | • Clay roof tile (without joint soil) | 7.8 | | 80 | 921 |
| | • Base plate (thickness 15) | 1.0 | 450 | 10 | (931) |
| | • Rafter | 0.2 | | 3.8 | |

다양한 한옥 중 A-1모델로 정면 5칸, 측면 2칸의 연면적 109.6 m²의 ‘一’자형 팔작집의 일반 주거용 건물로 설정하였다(Fig. 2).

또한 지붕을 구성하는 각 재료에 대한 성질은 시공 장소나 대상, 설계 및 시공자에 따라 상이하므로 표준화된 재료 물성값을 반영하기 위하여 건축구조기준(Korean Building Code 2009)의 제 3 장 하중 기준에 대한 해설서인 건축물 하중 기준 및 해설에 제시된 값을 사용하였다. Table 1은 한식 기와를 얻은 지붕 모델 중 본 연구에 해당되는 내용을 정리한 것이다. 또한 적설하중을 고려하여 수직 하중의 계산하여 보다 실제에 가깝도록 하였다.

2.2.2. 골조의 수평 내력 시험

접합부 실험을 위하여 Fig. 3과 같이 수평 하중 시험 장치를 사용하였다(황권환 등 2007). 수평 하중을 가력하는 로드셀은 최대 하중 15 tonf이며, ± 100 mm의 변위측정이 가능하다. 수평하중의 가력은 ACI (America Concrete Institute) T1.1-01의 기준과 ISO 16670를 준용하여 일정 회전각 기준으로 8단계별로 정부 하중을 3회 반복하여 진행하였으며, 최종 사이클에서는 파괴 시까지 최대 변형을 주었다(L. M. Lee 외 1999; Jeong-Moon Seo 외 1999; Gatto K. 외 2003). 수직 하중은 18개의 유압잭을 사용하여 계산된 수직 하중을 등분포하중으로 가력하도록 구성하였다. 접합부 실험을 위한 골조는 수직하중이 있는 것과 없는 것

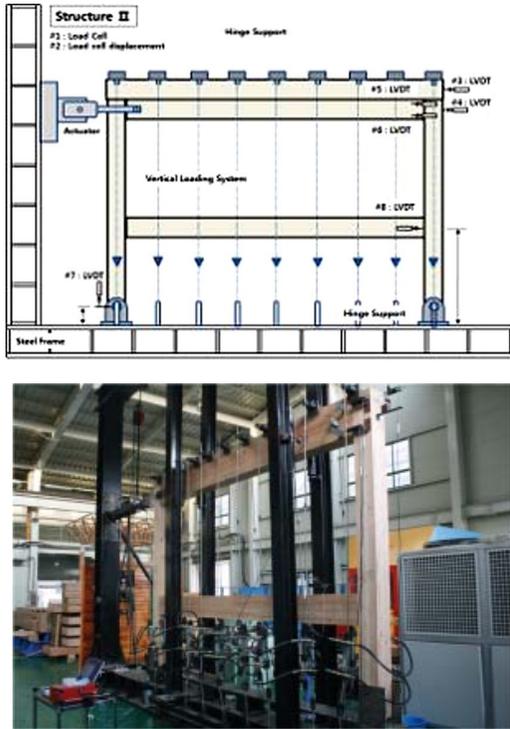


Fig. 3. Diagram of structural frame (up) and photo of test (down).

Table 2. Composition of wood frame

| Frame | Vertical load | Lintel | Repetition | Index |
|---------------|---------------|--------|------------|--------------------|
| Structure II | O | O | 2 | |
| Structure IV0 | X | X | 2 | |
| Structure IV1 | O | X | 1 | High Loading Speed |
| Structure IV2 | O | X | 2 | |

으로 구분하여 각각 제작하여 실험하였다. 골조는 바닥에 핀접합으로 고정하였으며, 각 측정 부위에 LVDT를 7개 설치하여 변위를 측정하였다. Fig. 3은 실험 모식도와 실제 실험 사진이다.

짜맞춤 접합부를 포함한 골조의 형태는 크게 3개의 형태로 나뉜다(Table 2). 수직하중이 있는 경우와 없는 경우, 인방이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우로 구분된다. 특히 수직하중을 받는 골조

의 경우 하중 속도를 기준 속도보다 빠르게 하여 그 영향을 고찰하고자 하였다. 다만 Structure I과 III(고정조건-강절)의 경우는 실험 오류(하중 Protocol 입력 오류)로 인하여 본 결과에서 제외하였다.

2.2.3. 반강성 접합부의 판별

접합부의 반강성 접합부를 판별하기 위하여 접합부 실험의 결과에 완전 탄소성 모델을 적용하여 최대 모멘트(M_u)과 회전각(θ_u)을 산출하였다. 이를 통해 반강성도를 결정하기 위한 모멘트(M_p)와 회전각(θ_p)을 설정하고, 식 1에 의해 무차원 변수를 계산하였다. 국내 기준이 없으므로 Eurocode 3에 따라서 접합부의 강성을 기준으로 강절과 반강절, 반강절과 핀접합의 경계를 구하여 해당 접합부를 반강성 여부를 판별하였다.

$$\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_p}, \bar{m} = \frac{M}{M_p}, \theta_p = \frac{M_p}{(EI_b/L_b)} \tag{1}$$

여기서, I_p 와 L_b 는 각각 보에 대한 단면 2차 모멘트와 보의 길이이다.

강성에 따른 강접합과 반강접합의 경계(비가새 골조)

$$\bar{m} \leq \frac{2}{3} \Rightarrow \bar{m} = 25\bar{\theta},$$

$$\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1.0 \Rightarrow \bar{m} = \frac{25\bar{\theta} + 4}{7} \tag{2}$$

강성에 따른 핀접합의 범위(반강접합과의 경계)

$$k_i \leq \frac{EI_b}{2L_b} = \frac{1}{2} \frac{M_p}{\theta_p} \tag{3}$$

여기서 k_i 는 반강성 접합과 핀접합의 경계치

2.2.3. 강성도의 평가

강성도는 접합부의 특성을 나타내는 값으로 거동의 형태를 알려주는 척도이다. 이는 골조의 기둥이 바닥에 완전한 핀접합을 이루며, 수평하중에 의

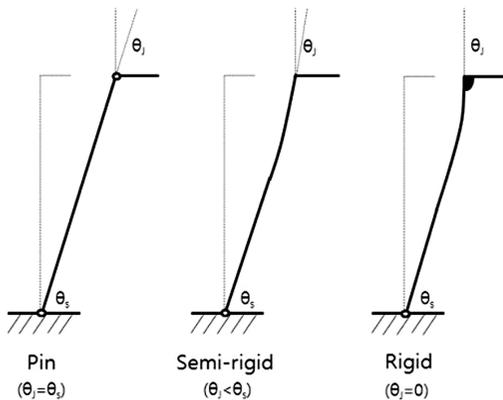


Fig. 4. Concept of stiffness ratio in each joint type.

한 접합부의 회전에 영향하지 않는다는 가정하에 산출할 수 있다. 즉 접합부가 완전한 핀접합으로 거동할 경우 지점과 동일하게 회전각을 나타내지만, 완전한 강접합의 경우 접합부 회전은 발생하지 않는다(Fig. 4). 따라서 강성도의 평가는 지점과 접합부의 회전각 비로 나타낼 수 있으며, 강성도가 0일 경우 완전한 핀접합, 1일 경우 완전한 강접합을 나타낼 수 있도록 지점 회전각에 대한 벽체 회전각 비를 구하고 이에 대한 역수를 강성도로 정의하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수직 하중의 평가

수직 하중은 지붕을 구성하는 재료에 의한 고정 하중과 적설하중을 고려하였으며, 활하중은 제외하였다. 지붕 단면을 경사도와 형태에 따라 Fig. 5와 같이 구분하였으며, 각각에 대하여 기와와 강회, 보토, 적심목, 서까래로 나누어 계산하였다.

Fig. 5 각각에서 경사도를 산출하면 각각 ①은 32.61도, ②는 32.61도, ③은 30.54도였으며, 지붕 면적은 56.44 (m²), 108.56 (m²), 42.70 (m²)이고, 전체 지붕 면적은 207.70 (m²)이었다. 서까래의 경우 아래 식에 의해 산출하였다.

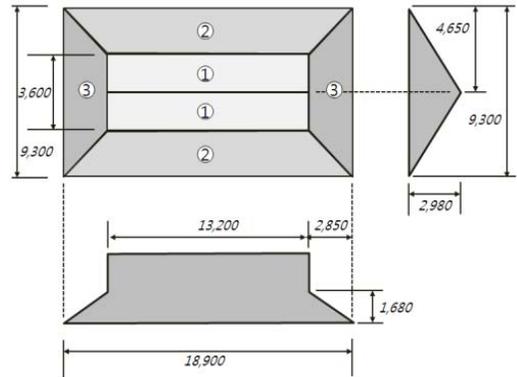


Fig. 5. Roof composition and slope (mm).

서까래에 의한 하중

$$= \pi \left\{ \frac{(L.D + S.D)}{4} \right\}^2 \times L \times S.G \times \left(\frac{MC}{100} + 1 \right) \times n \tag{4}$$

여기서, L.D. : 원구 직경(Large End Diameter)

S.D. : 말구 직경(Small End Diameter)

L : 서까래 길이, S.G. = 비중(Specific Gravity)

MC : 함수율 (%)

n : 서까래 개수

여기서 서까래 부재의 원구 직경은 150 mm, 말구 직경은 135 mm이며, 수종은 일반 소나무, 함수율은 12%, 비중은 0.5 (밀도 500 kg/m³)로 가정하여 진행하였다. 이를 통해 계산한 결과 서까래에 의한 총 하중은 67149 N이었다. KBC 2009와 앞서 구한 지붕 면적을 통하여 바닥판과 기와(강회와 보토 포함)의 하중은 총 189372 N이었다. 적설 하중은 국내 일반 지역의 최소지상적설하중인 50 kgf/m² (울릉도 및 일부 지역 제외)의 값에 지붕 면적을 곱하여 산출한 결과 101773 N로 계산되었다. 따라서 전체 지붕하중은 고정 하중과 적설하중을 합한 358294 N이며, 이를 20개의 기둥이 지지하고 있다. 따라서 두 개의 기둥이 지지하는 하나의 골조에 가해지는 지붕하중은 35829 (N)이다. 이를 두 기둥 사이의 보 길이 3.42 m로

Table 3. Shear properties of each frame

| | F_y | θ_y | K | F_{max} | θ_u | M_u |
|----------------|--------|------------|----------|-----------|------------|--------|
| Structure II | 109.60 | 0.004 | 36529.77 | 192.85 | 0.022 | 128.93 |
| Structure IV-0 | 96.75 | 0.016 | 6233.82 | 97.50 | 0.030 | 67.50 |
| Structure IV-1 | 115.13 | 0.004 | 27609.21 | 178.00 | 0.022 | 142.15 |
| Structure IV-2 | 122.71 | 0.003 | 47196.66 | 167.28 | 0.003 | 140.96 |

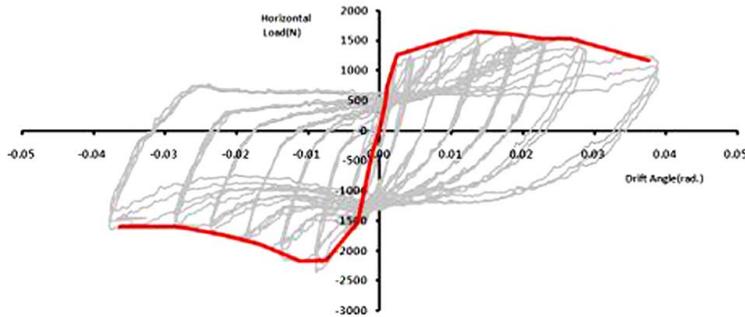


Fig. 6. Envelop curve of each frame (IV-2).

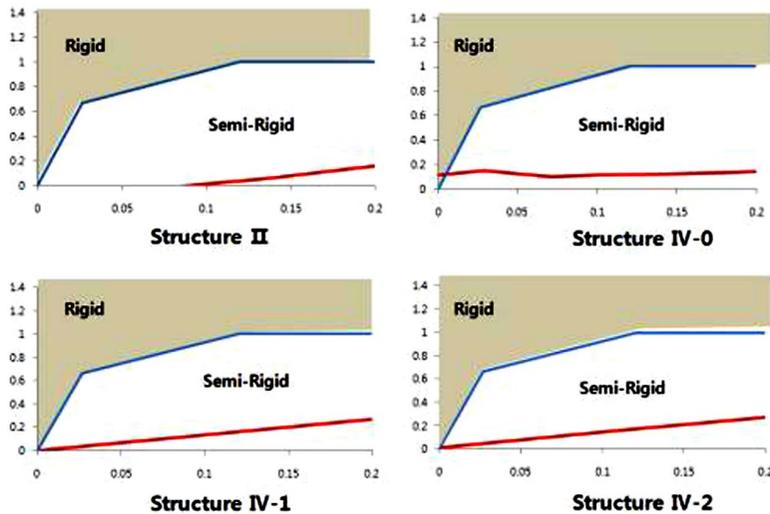


Fig. 7. Semi-Rigid joint (rigid-pin boundary).

나누면 10476 (N/m)의 분포하중이 산출되며, 이 값을 수직하중으로 재하하여 실험을 진행하였다.

3.2. 접합부 성능 평가

수평 반복 하중에 따른 접합부 성능 평가를 통

하여 접합부의 강성도를 평가하기 위하여 필요한 인자들은 완전 탄소성 모델을 기초로 하여 산출하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. Fig. 6은 일반적인 거동 형태를 나타낸 것이다(Wen-Shao 외 2006; 2007; Masahiro Noguchi 외 2006).

Table 4. Semi-rigid joint (semi-rigid-pin boundary)

| Frame | Initial stiffness (K) | Criteria |
|----------------|-----------------------|----------|
| Structure II | 36529.77 | 13804.61 |
| Structure IV-0 | 6233.82 | 3116.91 |
| Structure IV-1 | 27609.21 | 13804.61 |
| Structure IV-2 | 47196.66 | 23610.89 |

Table 5. Relation of hinge and drift angle

| Frame Number | Regression Eq. | Slope | R ² |
|----------------|----------------|-------|----------------|
| Structure II | $y = 1.666x$ | 1.666 | 0.973 |
| Structure IV-0 | $y = 2.023x$ | 2.023 | 0.997 |
| Structure IV-1 | $y = 1.794x$ | 1.794 | 0.979 |
| Structure IV-2 | $y = 1.680x$ | 1.680 | 0.986 |

3.3. 반강성 접합부의 판별

Eurocode 3에 따라 각 골조의 강접과 반강접의 경계를 구하고, 그 결과를 그래프로 정리하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 각 형태별로 수직 하중이 없고, 인방이 설치되지 않은 경우 거동 초기에는 강접합과 같은 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 모든 접합부가 대부분의 구간에서 강접합이 아닌 반강성 접합부 영역에 포함됨을 확인할 수 있다.

또한 핀 접합의 경계치를 구하고 이를 초기 강성과 비교하면 Table 4와 같다. 모든 접합부가 기준값보다 큰 결과를 나타내어 핀접합이 아닌 반강성 접합부임을 확인하였다.

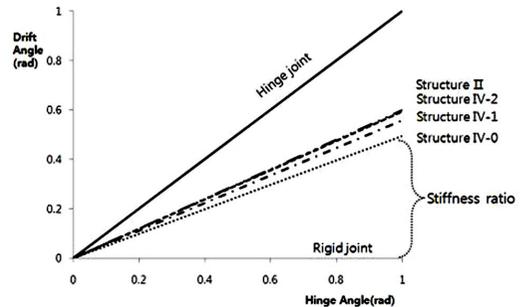
이들 결과로부터 목재 짜맞춤 접합부는 모두 강접합과 핀 접합 사이의 반강성 접합부임을 알 수 있다. 일반적으로 목재 짜맞춤 접합부가 반강성 접합부로 알려져 있으나 이를 수치상으로 확인함으로써 객관성을 확보할 수 있었다. 또한, 지붕 하중에 의한 수직하중의 유무와 인방의 설치 여부에 관계없이 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

3.4. 강성도의 평가

접합부가 핀접합이면 지점과 접합부의 회전각이 동일하다. 그러나 실제 거동에서는 차이를 나타내며, 이는 접합부가 반강성 접합부이기 때문인 것으

Table 6. Stiffness ratio of frame

| Frame number | Hinge angle/Drift ratio | Stiffness ratio |
|----------------|-------------------------|-----------------|
| Structure II | 1.67 | 0.40 |
| Structure IV-0 | 2.02 | 0.50 |
| Structure IV-1 | 1.79 | 0.44 |
| Structure IV-2 | 1.68 | 0.40 |

**Fig. 8.** Stiffness ratio of frame.

로 여겨진다. 이러한 결과는 모든 골조에서 동일하게 발생하였으며, Table 5의 각각의 회전각 사이의 직선회귀 분석 결과로 확인할 수 있다.

Table 6에서 알 수 있듯이 상관계수가 거의 1에 가까운 것을 알 수 있으나 각 벽체 형태에 따라서 기울기가 다른 것을 알 수 있다. 이를 근거로 하여 지점의 회전각에 대한 접합부의 회전각 비를 산출하고, 그 역수를 취하여 최종적으로 강성도를 평가하였다(Table 6).

강성도는 1의 값을 가질 경우 완전한 강접합을 의미하여 0은 핀 접합을 의미한다. 인방의 설치 유무와는 큰 차이가 없으나, 하중 속도가 빨라지면 강성도는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 수직 하중이 없는 경우에 강성도가 더 큰 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). 이러한 결과는 짜맞춤 접합부를 가진 기둥-보 형태의 목구조의 해석과 설계에 있어서 지붕에 의한 수직 하중에 맞추어 강성도를 입력해야 함을 알 수 있다. 또한 실제 지진과 같이 짧은 시간에 가해지는 수평하중의 경우 강성도를 크게 평가하여 해석과 설계를 진행해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 짜맞춤 접합부의 강성도를 수직 하중 유무, 인방의 설치 유무, 하중 속도 등에 따라 평가하였다. 강성도는 접합부의 성능을 결정하는 중요한 인자 중에 하나이다. 수직 하중이 있는 경우 강성도는 0.5에서 0.4로 감소하며, 인방의 유무에 관계없이 0.4의 값을 나타내었다. 하중 속도가 증가하면 0.4에서 0.44로 강성도 역시 증가하는 결과를 얻었다. 일반적으로 목재 짜맞춤 접합부는 반강성 접합부로 평가되어지나 정확하게 그 값이 평가되지 못하였다. 본 연구에서 짜맞춤 접합부의 반강성도는 0.40에서 0.44의 값을 나타남을 알 수 있다. 이러한 값은 짜맞춤 접합부를 가진 목구조에 구조 해석 프로그램을 적용할 경우 매우 유용하게 활용될 수 있다. 짜맞춤 접합부가 반강성 접합부인 것은 외부에서 하중이 가해질 경우 일정량의 모멘트를 전달하면서도 부재간의 회전을 발생시키며, 내부 변형을 통하여 에너지를 소산하여 구조적으로 매우 유리하다. 특히 지진 등의 반복 수평하중에 유리한 구조로 목구조의 장점으로 충분히 부각시킬 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2012년도 전북대학교 교비 연구 교원 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 한국표준협회. 2006. KS F 2154 경골목조 전단벽의 전단시험방법. 한국표준협회.
- 건설교통부. 2006. 건설교통통계연보. 건설교통부.
- 대한건축학회. 2009. 건축구조 설계기준. 대한건축학회.
- 권민호, 박문호, 장준호, 박순웅. 2002. 강구조물 지지부의 강성도가 구조물 거동에 미치는 영향. 한국전산구조공학회 논문집 15(1): 165-171.
- 김대영, 김지영, 김상대. 2001. 철골구조 반강접 접합부의 국내 적용 검토. 한국강구조학회 논문집 13(4): 71-81.
- 이기학, 우성우. 2007. 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 비탄성 회전 능력에 대한 성능 평가. 한국지진공학회 논문집 11(5): 1-9
- 이영욱, 홍성걸, 김남희, 정성진, 황종국, 배병선. 2007. 전통목구조 시스템의 도리방향 골조의 횡저항 성능에 대한 실험. 대한건축학회논문집 구조계. 29-36.
- 이영욱, 홍성걸, 황종국, 배병선. 2007. 전통 목구조 시스템에서 장부이음을 가진 도리 방향 골조의 수평하중 저항 능력. 대한건축학회지 23(2): 35-42.
- 한재수. 2005. 전통목조건축 접합부의 공학적 접근 필요성. 대한건축학회 논문집 49(12): 22-27.
- 황권환, 박주생, 박문재. 2007. 프리컷트 방식을 적용한 기둥-보 공법의 수평전단내력. 목재공학 35(6): 1-12.
- Gatto, K. and Uang, C. M. 2003. Effects of loading protocol on the cyclic response of woodframe shearwalls. Journal of Structural Engineering 1384-1392.
- Jeong-Moon Seo, In-Kil Choi, and Jong-Rim Lee. 1999. Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load. Journal of Structural Engineering 125(3): 344-349.
- Masahiro N., and Kohei K. 2006. Estimation of stiffness and strength in timber knee joints with adhesive and verification by experiment. Journal of Wood Science 52(5):411-421.
- Wen-Shao Chang, Min-Fu Hsu, and K. Komatsu. 2006. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap I: theory and verification. Journal of Wood Science 52(1): 58-62.
- Wen-Shao Chang and Min-Fu Hsu. 2007. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap II: the behavior of butted Nuki joint and its comparison with continuous Nuki joint. Journal of Wood Science 53(5): 401-407.
- Wen-Shao Chang, K. Komatsu, Min-Fu Hsu, and Wei-Jye Chen. 2007. On mechanical behavior of traditional timber shear wall in Taiwan I: background and theory derivation. Journal of Wood Science 53(1): 24-30.