

목조 구조물 접합부의 강성에 대한 근사평가를 위한 해석모델

조 소 훈^{1*} · 이 현 우¹ · 박 문 재² · 김 태 진¹ · 김 종 호¹

¹창민우구조건설타트, ²국립산림과학원 임산공학부

Analysis Model for Approximate Evaluation of Stiffness for Semi-Rigid Connection of Wooden Structures

So-Hoon Cho^{1*}, Heon-Woo Lee¹, Moon-Jae Park², Taejin Kim¹ and Jong-Ho Kim¹

¹Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul, 135-907, Korea

²Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul, 130-712, Korea

Abstract

Modern wooden structures usually are connected with steel fastener type connectors. And joints using multiple connectors in wooden structures will form semi-rigid connection. If connection in wooden structure would be designed to be pinned joint, the underestimate for loads transmitted through connection, would result in the deficient capacity of resistance in connection. And if joints in wooden structures would be assumed to be fully-rigid joint, amount of fasteners needed at the connection could be excessively increased. It will give a bad effect in the view of beauty, constructability and economy. Estimate for the reasonable stiffness of connection might be essential in design of reasonable connection in wooden structure. This paper will suggest analysis modelling technique that can represent approximate stiffness of connections using a common analysis program for double shear connection in order to give help in performing easily the design of wooden structure. It is verified that the suggested approximate analysis modelling technique could represent the behavior in connection by comparing the analysis results with test results for tensile, bending moment.

Keywords : double shear, wood, semi-rigid connection, approximate analysis model

1. 서 론

국내에 목조 구조물은 대부분 규모가 2층 이하로써 큰 하중을 지지하는 구조물에 설치된 사례는 없었다. 그래서 목조 구조물의 접합부에 작용하는 하중이 크지 않았고 접합부를 보수적으로 설계하여도 시공 및 안전성에 큰 무리가 없었다. 그러나 국내에서도 강릉·피겨쇼트트랙 경기장의 지붕을 목조 구조물로 설계를 수행하였고 친환경 재료인 목재에 대한 일반인의 인식이 좋아짐에 따라서 대경간 구조물에 대해서도 친환경 자재인 목재의 적용빈도가 높아질 것으로 기대되고 있다. 대경간 구조물에서는 한 번에 운반하기 힘든 부재의 길이를 가지므로 부재를 현장에서 이어서 시공해야 한다. 그리고 이러한 대경간 구조물의 부재로 사용되는 대단면 부재

의 접합부에는 상당히 큰 하중이 작용하므로 보수적으로 설계할 경우에 요구되는 접합철물(fastener)이 지나치게 많아지기 때문에 미관상으로도 좋지 않을 뿐만 아니라 지나치게 많은 수의 볼트는 시공적인 측면에서도 많은 문제가 발생하기도 한다.

일반적으로 목조 구조물에서 접합부를 강접합으로 가정할 경우에 접합부에 작용하는 하중이 너무 커서 과대 설계가 되기 쉽다. 그리고 접합부를 핀 접합으로 가정할 경우에는 접합부에 실제로 작용하는 하중보다 과소평가함으로써 접합부가 취약해 지기도 한다. 접합부의 합리적인 설계를 위해서는 접합부의 강성에 기인한 작용하중을 산정하는 것이 우선되어야 한다. 특히 대단면 부재가 적용되는 구조물처럼 접합부에 작용하는 하중이 큰 경우에는 보다 정밀하고 합리적이고

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2085-7160; E-mail: cshoon@minwoo21.com

Received November 20 2014; Revised November 25 2014

Accepted November 26 2014

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정밀한 해석 및 설계기법이 요구된다.

접합부의 강성을 해석모델에 보다 정확하게 반영하기 위하여 접합부의 변형을 고려할 수 있는 해석모델에 대한 연구는 철골 구조물을 대상으로 많이 진행되어 왔다. 철골 구조물에서는 보와 기둥이 접합되는 접합부에서의 판넬존 부분에 대한 변형을 고려할 수 있는 방법이 주로 연구되었다. Tsai 등(1990)은 강역(rigid zone)의 길이를 조절하여 판넬존의 전단변형을 고려할 수 있는 방법을 제안하였고, Schneider 등(1998)은 판넬존의 비틀림을 고려하기 위한 2개의 2차선형(bilinear) 회전 스프링을 도입하는 방법을 제시하였다. 그리고 Lee 등(2004)은 판넬존의 변형을 트러스 변형으로 치환하여 반영할 수 있는 모델을 제시하기도 하였다.

목조 구조물에 대해서 반강접 접합부의 거동을 반영하기 위하여 Smith 등(2006)은 접합철물을 해석모델에 반영하고 접합철물의 탄성계수를 실험에 근거하여 조절하는 방법을 제시하였고 Awaludin(2005)은 접합부의 하중이 비균질 재료인 목재를 통하여 힘이 전달되어 개별 볼트에 작용하는 하중을 합리적으로 예측하는 방법을 제시하기도 하였다.

목조 구조물의 접합부에서 볼트의 설계하중은 일반적으로 강제 거동을 가정하고 산정한다. 그러나 대형 목재 부재의 이음에서는 접합부의 범위가 크고 이 범위에서 비균질 재료인 목재의 변형이 볼트에 전달되는 하중에 영향을 줄 가능성이 많지만 이에 대하여 간단한 예측 또는 해석방법이 제안되어 있지 않다. 국내에서 대단면 부재를 이용하여 시공된 한아름교의 설계에서는 목재의 비균질성을 반영하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하여 접합부를 검토하였다(Shim *et al.*, 2012). 그러나 Hwang 등(2002)에 의하면 볼트를 통하여 하중이 전달될 때와 같은 조건인 목재 위에 볼트를 얹은 후 하중을 가력하였을 때 발생하는 변형은 목재의 탄성계수에 근거한 탄성변형보다 훨씬 큰 값을 가지게 된다. 그러므로 유한요소를 이용하여 목조 구조물의 접합부를 해석하기 위해서는 재료의 일반적인 특성 외에도 추가적인 상세한 특성에 대한 정의가 필요한데 이것은 대부분 실험에 의하여 구하게 된다. 그리고 목조구조물의 설계에서 모든 접합부에 대하여 유한요소해석이 요구된다면 설계비용이 늘어날 뿐만 아니라 요구되는 설계일정도 길어지게 되어 목조 구조물의 활성화에 장애물로 작용할 것이다. 본 논문에서는 목조 구조물의 설계를 보다 쉽게 접근할 수 있고 목조 구조물의 보급에도 도움이 될 수 있도록 2면 전단 접합 이음상세에 대하여 건축 구조물의 설계에 널리 이용되는 상용 해석프로그램을 이용하여 접합부의 강성을 합리적으로 표현할 수 있는 해석 모델 및 방법을 제안하고자 한다.

2. 목조 구조물에 대한 기존 접합부 해석모델

목조구조물의 접합부 강성을 합리적으로 반영하기 위하여 Smith 등(2006)은 2면 전단접합을 이용한 목조 구조물의 접합부를 Fig. 1과 같은 방법을 이용하여 해석하는 모델을 제안하였다. 이 모델에서는 접합부의 변형을 반영하기 위하여 부재 중심축을 연결하는 접합철물을 모델링하고 접합철물의 탄성계수를 변화시킴으로써 접합부의 강성을 나타낼 수 있도록 모델링하였다.

그런데 이 해석모델에서는 접합철물의 탄성계수를 실험결과에 의하여 결정할 것을 제안하고 있는데 모든 목재 접합부에 대하여 실험을 수행할 수 없기 때문에 이 방법을 직접적으로 실무에 적용하기는 어렵다. 그러나 접합철물을 해석모델에 직접 모델링하고 접합철물의 탄성계수를 조절하여 여러 가지 요인으로 인한 변형을 접합철물의 변형으로 대체하는 것은 상당히 합리적인 접근법으로 보인다.

Awaludin(2005)은 Fig. 2와 같이 목재가 볼트의 탄성기초로 거동하는 것으로 가정하고 탄성기초를 제외하고는 일반 보와 동일한 유사한 조건이므로 보에서와 같은 방법으로

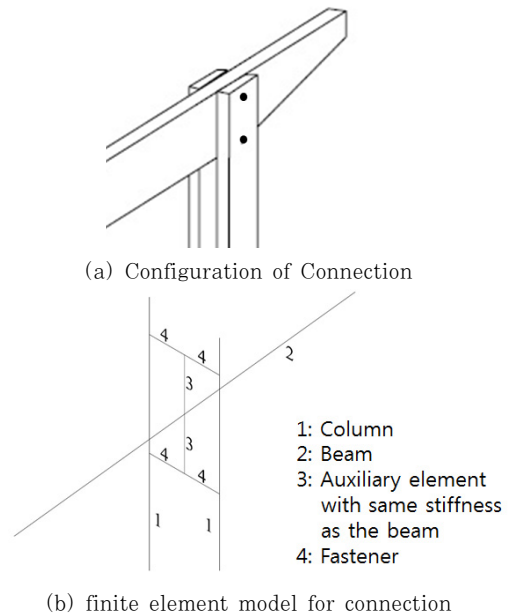


Fig. 1 Analysis model for bolting connection in wooded frame proposed by Smith(2006)

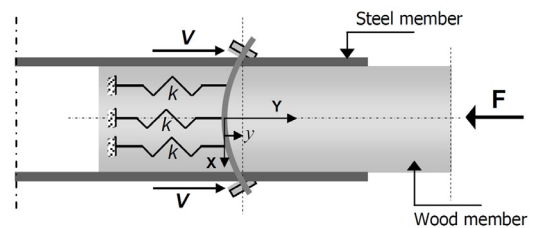


Fig. 2 Bolt under bending in steel to wood connection

하중 및 변형에 대한 미분방정식을 도출하고 이에 대한 일반해를 구하여 볼트에 작용하는 하중을 산정하였다. 이 때 볼트의 경계조건에 대해서는 볼트와 와셔로부터 구속력이 고려되는 경우와 볼트와 와셔로부터의 구속력이 없는 경우에 대하여 각각 해를 구하였다.

3. 목조 구조물 접합부에 대한 근사해석 모델링 방법

목구조물의 부재 이음에 사용되는 접합종류는 쪽매를 이용한 방법, 볼트를 이용한 방법 등 다양한 방법이 있다. 우리나라 고건축물인 경우에는 철물을 사용하지 않는 접합 방법이 적용되었지만 현대 목조 구조물에서는 접합철물을 이용한 접합방법이 널리 이용되고 있다. 목조 구조물에서 접합부에 작용하는 하중은 일반적으로 탄성해석에 근거하여 산정되므로 목조 구조물의 탄성영역에서의 거동을 합리적으로 재현하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 실무에서 널리 사용하는 프로그램을 이용하여 보다 편리하게 목조 구조물의 반강접 접합부의 강성을 근사해석에 의하여 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

접합철물을 이용한 목조 구조물의 접합부에서는 하중이 접합철물을 통하여 전달되기 때문에 접합철물의 변형과 접합부의 강성은 밀접한 관계를 가지고 있다. 2절에서 살펴본 Awaludin(2005)도 볼트의 휨 변형과 일치하는 것에 근거하여 해석모델을 제시하기도 하였고 Smith 등(2006)도 접합철물의 휨 변형을 실험값과 일치시키도록 접합철물의 탄성계수를 조절하여 해석할 것을 제시하기도 하였다.

볼트의 변형에 영향을 미치는 요소로는 접합되는 목재의 종류 및 두께와 방향성 그리고 접합철물의 배치와 지름 등 다양한 요소들이 있다. 이 요소들은 접합철물의 변형에 영향을 미칠 뿐만 아니라 철물을 이용한 접합부의 내력을 결정하는 요소들이기도 한다. 2면 전단접합에 대하여 내력은 위 요소들이 복합적으로 작용하여 결정된다. 국내에서 목조 구조물의 접합부에 가장 널리 사용되는 접합철물인 볼트에 대해서 2면전단접합의 내력을 KBC-09에서는 Fig. 3에 있는 파괴모드에 근거한 내력 중에서 최소값으로 정하도록 규정하고 있다.

볼트의 재료인 강재에 비하면 목재의 탄성계수는 월등히 작을 뿐만 아니라 목재인 경우에는 볼트를 통해 집중응력을 받을 때 지압부에서의 변형이 목재의 탄성상태에서 보다 훨씬 커지는 특성이 있다. 그러므로 목재의 지압강성을 무시하고 볼트에 작용하는 하중분포 및 경계조건을 합리적으로 추정할 수 있다면 볼트의 변형을 산정할 수 있을 것이다. 1면 전단접합에 대하여 Awaludin(2005)는 파괴 모드에 따라서

Failures Modes	Deformation Shape	Stress Distribution	Formula for Shear Resistance (Z)
Mode I_m			$\frac{D t_m F_{em}}{4 K_\theta}$
Mode I_s			$\frac{D t_s F_{es}}{2 K_\theta}$
Mode III			$\frac{k_3 D t_s F_{em}}{1.6 K_\theta (2 + R_c)}$
Mode IV			$\frac{D^2}{1.6 K_\theta} \sqrt{\frac{2 F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_c)}}$
Note	$k_1 = \frac{\sqrt{R_c + 2R_c^2(1 + R_t + R_t^2) + R_c^2 R_c^3 - R_c(1 + R_t)}}{(1 + R_c)}$ $k_2 = -1 + \sqrt{2(1 + R_c) + \frac{2F_{yb}(1 + 2R_c)D^2}{3F_{em}l_m^2}}$ $k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_c)}{R_c} + \frac{2F_{yb}(2 + R_c)D^2}{3F_{em}l_m^2}}$ <p> D = Diameter F_{yb} = Bolt bending yield strength R_d = Reduction term $R_c = F_{em}/F_{es}$ $R_t = l_m/l_s$ l_m = main member bolt bearing length l_s = side member bolt bearing length F_{em} = main member bolt bearing strength F_{es} = side member bolt bearing strength </p>		

Fig. 3 Analysis model for bolting connection in wooded frame proposed by smith(2006)

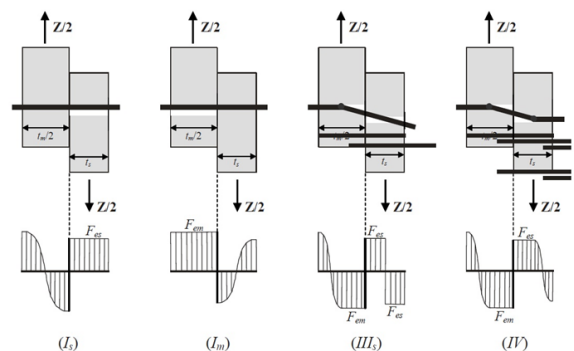


Fig. 4 Failure modes and its bearing stress distribution of timber bolted-connection

볼트에 가해지는 하중의 분포형상을 Fig. 4와 같이 제시하고 있다.

본 논문에서는 Fig. 4로부터 유추하여 파괴모드에 따른 2

Failures Modes	Stress Distribution	Calculation of Stress
Mode I_m		$q_s = \frac{Z_L}{Z} \times \frac{P/2}{t_s}$ $q_m = \frac{P}{t_m}$
Mode I_s		$q_s = \frac{P/2}{t_s}$ $q_m = \frac{Z_L}{Z} \times \frac{P}{t_m}$
Mode III		$q_s = \frac{Z_L}{Z} \times \frac{P/2}{t_s}$ $q_m = \frac{Z_L}{Z} \times \frac{P}{t_m}$
Mode IV		$q_s = \frac{Z_L}{Z} \times \frac{P/2}{t_s}$ $q_m = \frac{Z_L}{Z} \times \frac{P}{t_m}$

Fig. 5 Stress distribution of bolts for timber double shear bolted-connection

면 전단접합인 볼트에 가해지는 하중분포를 Fig. 5와 같이 제시하고 제시된 하중분포에 근거하여 볼트의 변형을 예측하여 접합부의 거동도 근사적으로 재현하고자 한다.

위 Fig. 5에서 Z_L 는 I_s 유형에 대응되는 전단저항성능을 의미하고 Z_L 는 I_m 유형에 대응되는 전단저항성능을 의미한다. 측면부재의 외피에서는 반력이 가해질 수 없으므로 측면부재와 중심부재의 반력만으로 힘의 평형이 이루어져야 한다. 볼트를 단순보로 모델링하고 중심부재와 측면부재의 반력을 볼트하중으로 가하더라도 하중 자체적으로 힘의 평형이 이루어지므로 반력이 요구되지 않고 이것은 측면부재의 외피와 같은 경계조건을 재현할 수 있다. 볼트의 너트가 있을 경우에 너트로 인하여 회전에 대하여 약간의 회전에 대한 구속력이 작용할 수 있지만 그 값이 미미하므로 너트로부터의 회전에 대한 구속을 무시하면 단부에서 단순 지지된 경계조건을 가지게 모델링할 수 있다.

목조 구조물의 접합부의 변형은 크게 목재의 변형과 볼트의 변형으로 구분할 수 있다. 볼트의 변형은 볼트의 지름 및 배치와 밀접한 관계가 있으므로 Smith 등(2006)가 제시한 것과 같이 부재의 중심선을 연결하는 접합부의 모든 볼트를 모델링하고 볼트의 탄성계수를 볼트에 가해지는 하중분포를 합리적으로 적용하면 실험을 통하지 않고서 볼트의 변형을 근사적으로 재현할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 볼트의

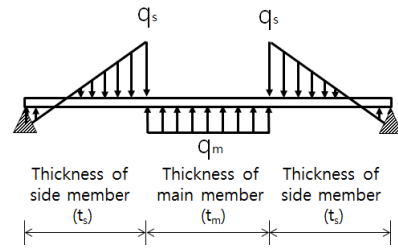


Fig. 6 Simple beam model for bolt applied to distributed load

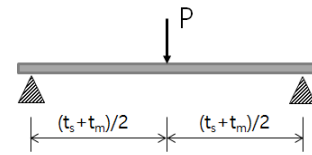


Fig. 7 Simple beam model for bolt applied to concentric load

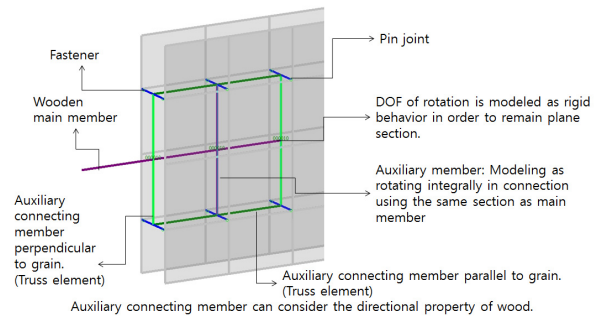


Fig. 8 Analysis model for timber double shear bolted-connection

탄성계수를 합리적으로 결정하기 위하여 다음과 같은 절차를 제시한다.

- ① 접합부 볼트의 전단내력을 결정하는 파괴유형을 알아내고 그에 대응하는 응력분포를 Fig. 5에 따라서 가정한다.
- ② 가정된 응력분포를 가진 볼트를 단순보로 모델링하여 볼트 중앙부에서의 변형(d_c)을 계산한다.
- ③ 중앙 집중하중으로 작용할 때의 중앙부 변형(d_c)을 계산한다.
- ④ Fig. 8과 같이 접합부를 모델링한다. 접합부를 모델링할 때 휨 및 전단을 받는 근사해석 모델에서는 섬유방향 목재 변형을 나타내는 부재와 섬유직각방향 목재의 변형을 나타내는 부재의 탄성계수를 다르게 적용함으로써 목재의 방향성을 나타낼 수 있다. 그리고 원래 평면을 유지하던 단면은 변형한 후에도 평면을 유지하도록 회전에 대하여 강체거동을 하도록 모델링한다. 이 때 볼트의 탄성계수는 강재의 탄성계수, E_s 에 d_c/d_d 를 곱하여 보정한 값을 적용한다.

4. 근사해석모델에 대한 해석결과 분석

본 논문에서 반강접 접합부에 대한 해석 모델의 타당성을 검증하기 위하여 인장력을 전달하는 접합부와 휨 모멘트를 전달하는 접합부에 대하여 실험결과가 소개된 접합상세를 대상으로 접합부에서의 강성을 비교하였다.

4.1 인장력을 전달하는 접합부에 대한 결과 비교

인장력을 전달하는 볼트 접합상세에 대하여 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 Gattesco 등(2004)에 의하여 수행된 실험체에 대하여 제안된 방법으로 해석한 결과와 실험 결과값을 비교하였다. 먼저 실험체 목재부재의 폭은 150mm 이고 두께는 110mm이고, 10mm 두께를 가진 150mm폭의 철판이 연결철물로 삽입된다. 볼트 간격과 끝단의 길이는 모두 112mm이고 목재의 길이방향으로 하중이 작용하였으며, 직경이 16mm인 볼트를 사용하였다. 실험에 사용된 목재의 특성은 Table 1에 나타나 있다.

제안된 방법을 적용하기 위하여 먼저 볼트의 파괴 모드 및 볼트 1개의 허용내력을 KBC-09기준에 따라서 산정한 결과가 Table 2에 나타나 있다. 볼트의 내력을 산정할 때 목재의 비중은 Table 1에 의하면 약간의 편차가 있지만 본 검토에서는 일괄적으로 0.43을 사용하였고 사용된 볼트는 class 8.8(항복강도 $f_{ys} = 826\text{MPa}$)을 사용하였고 연결철판은 Fe

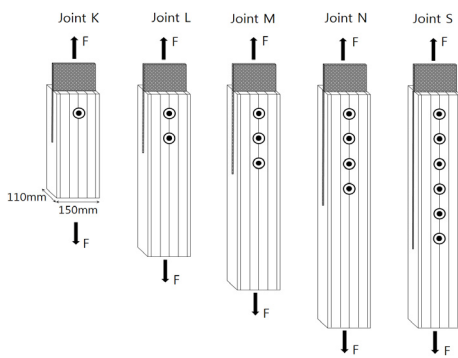


Fig. 9 Joint types tested

Table 1 Physical and mechanical characteristics of specimen timbers

Joint Type	Specific Gravity	Embedding strength (MPa)	Elastic Modulus [MPa]	
			Parallel to grain	Perpend. to grain
K	0.445	35.6	13781	290
L	0.432	32.8	14484	258
M	0.438	34.9	14709	273
N	0.456	36.1	14314	352
S	0.428	33.4	13382	322

Table 2 Design value of bolts for double shear connection used in tension tests

Failure Modes	I_m (N)	I_s (N)	III (N)	IV (N)
Design value(Z)	9400	6354	6366	8872

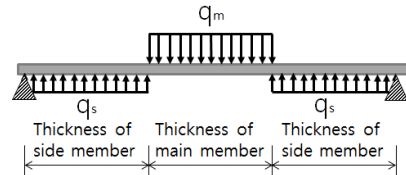


Fig. 10 Distribution of stress applied to bolt used in tension test

510(항복강도 $f_{ys} = 432\text{MPa}$)을 적용하였다.

파괴모드는 측면부재인 목재의 지압파괴인 Mode I_s 에 의하여 전단내력이 결정되므로 이 때 대응되는 응력분포는 Fig. 10과 같이 적용하여 부재 중앙에서의 변형(d_d)을 구하였다. 이 때 철판의 경우에는 두께가 얇기 때문에 응력분포의 변화가 볼트 변형에 주는 영향이 미미하므로 균등한 것으로 적용하였다.

다음으로 Fig. 7과 같이 중앙 집중하중이 작용할 때의 변형(d_c)을 산정한 후에 변형비(d_c/d_d)를 강재의 탄성계수에 곱하여 볼트의 치환탄성계수를 산정하였다. 이와 같은 방법으로 산정한 볼트의 치환탄성계수를 Fig. 11에 나타난 것과 같은 근사해석모델에 적용하였고 근사해석모델을 해석한 결과와 실험결과에 의한 강성이 Table 3에 비교되어 있다.

Table 3을 보면 K, L 유형(Type)은 근사해석결과가 실험치에 의한 값보다 강성을 약 10%정도 과소평가하는 것으로 검토되었고 M, N, S 유형은 과대평가하고 오차율도 약 40%까지 증가하는 것으로 나타났다. 그런데 실험값은 각각

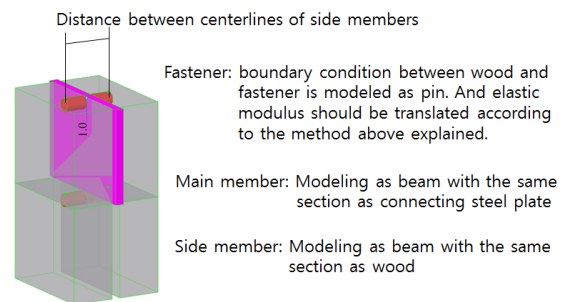


Fig. 11 Analysis model for L-Type connection

Table 3 Comparison of stiffness for tension test

Type	K	L	M	N	S
Test(kN/mm)	58.41	111.10	131.30	131.33	146.61
Analysis(kN/mm)	53.53	101.99	142.11	171.61	201.17
Errors(%)	-8.35	-8.2	8.23	30.67	37.21

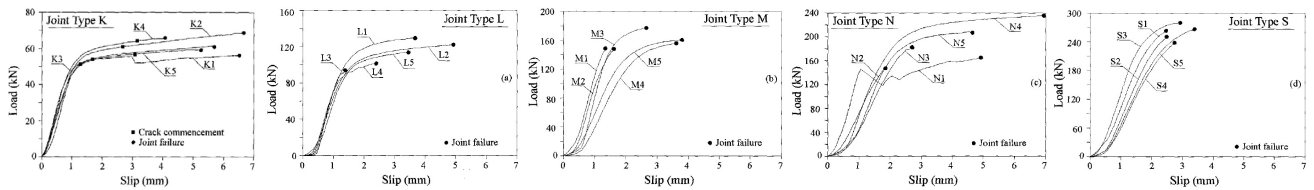


Fig. 12 Load-slip curves for single bolt joints Fig. 13 Load-slip curves for two bolts joints Fig. 14 Load-slip curves for three bolts joints Fig. 15 Load-slip curves for four bolts joints Fig. 16 Load-slip curves for six bolts joints

의 유형에 대하여 5개의 실험결과에 대한 평균값을 나타내는 것인데 Fig. 12~16을 보면 K, L 유형은 5개의 실험체가 유사한 형태를 가지지만 M, N, S 유형의 실험결과들은 다소 편차를 보이는 실험결과를 보이고 있다.

근사해석은 목재와 다우일이 접촉하는 부분에서의 지압강성을 무시하기 때문에 실제보다 강성이 약간 적게 나올 것으로 예상되는데 K, L 유형은 예상과 같은 결과를 보여주지만 M, N, S 유형은 근사해석결과가 강성을 과대평가하면서 오차가 커지는 것으로 검토되었다. 이것은 M, N, S 유형의 실험체는 실험체의 길이가 길어지면서 목재의 응이, 갈라짐 등 목재의 균질하지 못한 성질이 강성에 영향을 주면서 실험체간 편차도 커지면서 강성도 줄어드는 것으로 예상된다. 즉, K, L 유형의 실험결과와 근사해석결과에 근거하면 본 연구에서 제안한 근사해석방법이 실제 목재의 거동을 근사적으로 나타낼 수 있는 것으로 볼 수 있다. 다만 약간의 강성저하는 목재와 볼트가 접촉하는 부분의 지압강성을 무시함으로써 발생한 것으로 예상된다.

4.2 휨 모멘트를 전달하는 접합부에 대한 결과 비교

휨 모멘트를 전달하는 접합상세의 강성을 근사해석모델을 이용하여 평가할 때의 타당성을 검토하기 위하여 Awaludin 등(2007)에 소개된 실험체를 대상으로 근사해석모델을 적용하였다.

실험체의 주구조재는 34mm 두께에 200mm 높이를 가진 목재이고 연결부재도 주구조재와 동일한 34mm 두께의 목재가 사용되었다. 볼트 구멍지름 13mm에 12.4mm 지름의 볼트가 삽입되었다. 목재의 종류는 Shorea obtusa가 사용되었다. Shorea obtusa 수종에 대한 탄성계수는 Eratodi 등(2006)을 참조하여 12.42GPa를 사용하여 근사해석모델에 적용하였다.

본 논문에서 제안된 방법으로 접합부를 근사해석 하기 위해서는 먼저 KBC09 기준에 따라 볼트의 접합부의 내력을 산정하여야 하는데 볼트재료에 대한 자료와 목재의 비중에 대한 자료가 없었기 때문에 본 논문에서는 볼트 재료로 SS400을 가정하고 탄성계수가 12.42로 아주 높은 편이기 때문에 KBC-09기준에서 정의한 가장 큰 목재 비중인 0.55를 적용하여 내력을 구하였다. 파괴모드에 따른 볼트의 허용내력은 Table 4에 나타나 있다.

Table 4에 따르면 실험체에 적용된 접합부는 주부재의 지압강도에 의해 허용내력이 결정되므로 볼트의 치환강성을 추정하기 위하여 Fig. 19와 같은 응력분포를 가진 하중이 볼트에 가해졌을 때 부재 중앙에서의 변형(d_d)을 구하였다.

다음으로 중앙 집중하중을 받을 경우의 볼트 변위(d_c)를 구하고 강재의 탄성계수 E_s 에 d_c/d_d 를 곱하여 볼트의 치환탄성계수를 산정한 후에 Fig. 8에 나타난 것과 같은 방법으로 접합부를 모델링한다. 이와 같은 방법으로 실험체 6H에 대하여 모델링한 것이 Fig. 20에 나타나 있다. 실험체에 대한

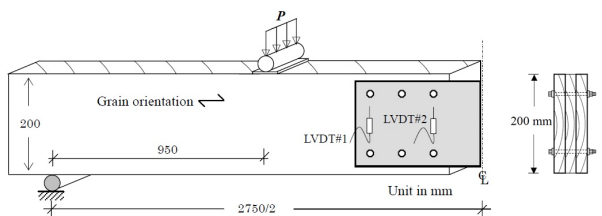


Fig. 17 Simplified test set-up(half of symmetry)

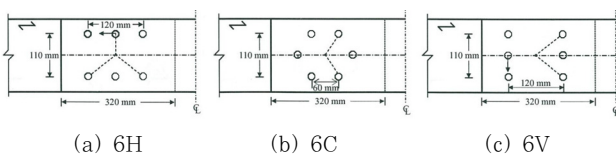


Fig. 18 Fastener arrangements

Table 4 Design value of bolts for double shear connection used in bending tests

Failure Modes	I_m (N)	I_s (N)	III(N)	IV(N)
Design value(Z)	4580	9160	5084	5606

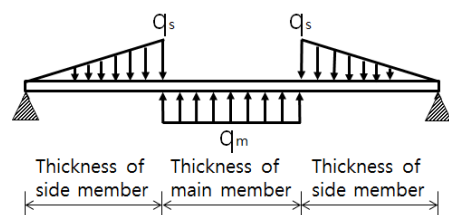


Fig. 19 Distribution of stress applied to bolt used in bending test

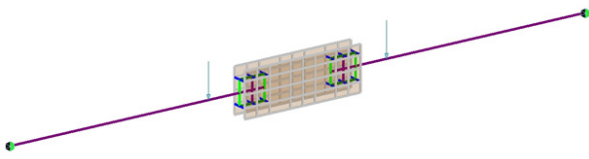


Fig. 20 Analysis Modelling for 6H

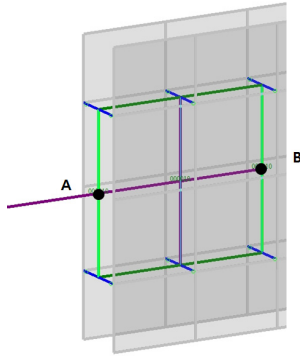


Fig. 21 Reference points for the rotation

목재 직각방향의 탄성계수에 대한 정보는 없었기 때문에 Table 1에 있는 것과 유사한 비율을 가지도록 섬유길이방향의 탄성계수의 1/45배를 곱하여 섬유직각방향의 탄성계수를 가정하였다.

모멘트에 대한 강성은 회전강성으로 나타내어야 한다. 회전강성을 구하기 위해서는 먼저 회전각, θ 를 산정하여야 한다. 회전강성을 구하기 위하여 Fig. 21에 표시된 것과 같이 A지점과 B지점의 수직변위의 차이를 산정한 후에 그 사이의 거리로 나누면 $\tan\theta$ 가 되는데 각도가 미소한 경우에는 $\tan\theta \approx \theta$ 이므로 A지점과 B지점의 수직변위의 차이를 그 사이의 거리로 나눈 값을 회전각, θ 로 볼 수 있다. Awaludin 등 (2007)에서도 이와 같은 방법으로 회전강성을 산정하였고, 본 논문에서도 동일한 방법으로 접합부에서의 회전각, θ 를 구하고 휨 모멘트를 회전각으로 나눈 값으로 회전강성을 산정하였다. 실험에 의한 회전강성과 근사해석에 의한 회전강성을 비교한 것이 Table 5에 나타나 있다.

Table 5를 보면 오차율이 15%이내의 범위에 있는 것을 보여준다. Fig. 12~16에서 보았듯이 목조구조물의 접합부에서 볼트 개수가 많아질수록 불확실한 요소들이 증가하므로 동일한 조건으로 실험한 실험체간의 편차도 상당하다. 이를

반영하여 구조설계기준의 허용 응력 설계법에 적용되는 안전율에서 차이를 보이고 있다. 공장에서 생산되는 균질한 재료인 강재에 대해서는 국내 기준 뿐만 아니라 미국 기준인 AISC(America Institute Steel Construction)에서 1.5의 안전계수를 적용하는데 반하여 미국 목재 기준인 NDS(National Design Specification)에서는 목재의 안전율로 2.16을 적용하고 있다. 즉 목재의 경우에는 품질의 편차 및 여러 가지의 불확실성을 고려하여 강재보다 40% 이상의 안전율을 추가로 요구하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제시한 근사해석모델이 실험 결과와 최대 40%정도의 오차를 보이고 있지만 목재의 편차를 고려하면 목조 구조물의 거동을 근사적으로는 나타내고 있는 것으로 보인다.

5. 결 론

목구조 접합부의 근사해석을 위한 제안된 해석모델에 대한 검토 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 논문에서 사용된 예제 구조물에 대하여 제안된 방법으로 목구조물을 해석할 때 예상 오차는 약 40%까지 발생하는 것으로 검토되었다. 이러한 오차는 균질한 공장생산 제품인 강재구조물에 대해서는 상당히 큰 오차이지만 불확실한 요소가 많은 목재의 특성을 감안하면 목조 구조물의 접합부 거동을 근사적으로는 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 목재의 경우 수종 및 환경에 따라서도 특성이 다르고 실험결과에서의 편차도 상당히 크다. 본 논문에서는 해외에서 수행된 제한된 실험결과만을 참조하여 근사해석모델의 타당성을 검토하였는데 근사해석모델을 국내 목조 구조물에 설계에 적용하기 위해서는 국내 목재를 적용한 접합부에 대해서도 근사해석모델의 타당성에 대한 추가적인 검증이 필요해 보인다.

감사의 글

이 연구는 국립산림과학원 평가원(KFRI)에서 연구비를 지원받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

Awaludin, A. (2005) Moment Resistance Analysis on Various Configuration of Multiple-Bolt Timber Connection using Beam on Elastic Foundation Theory and Rigid Plate Assumption, 13, Media Komunikasi Teknik Sipil, pp.57~62.

Table 5 Comparison of connection's stiffness for rotation

Bolt's Arrangement	Rotational Stiffness by tests (kNm/rad)	Rotational Stiffness by analysis (kNm/rad)	Errors (%)
6H	454	505	11.2
6C	450	474	5.3
6V	485	531	9.5

- Awaludin, A.** (2005) Safety Factor of Timber Bolted-Connection Designed with SNI-5(2002), *J. Teknik Sipil*, 12, pp.87~92.
- Awaludin, A., Smittakorn, W., Hayashikawa, T., Hirai, T.** (2007) M- θ Curve of Timber Connection with Various Bolt Arrangements Under Monotonic Loading, *J. Struct. Eng.*, 53A, pp.853~862.
- Eratodi, I.B., Triwiyono, A., Awaludin, A., Prayitno, D.T.** (2013) Perilaku Kekakuan Sambungan Struktur Bambu Laminasi Menggunakan Pelat dan Paut, Konferensi Nasional Teknik Sipil, 7, pp.91~98.
- Gattesco, N., Toffolo, I.** (2004) Experimental Study on Multiple-Bolt Steel-to-Timber Tension Joints, *Mater. & Struct.*, 37, pp.129~138.
- Hwang, K., Homatsu, K.** (2002) Bearing Properties of Engineered Wood Products I: Effects of Dowel Diameter and Loading Direction, *J. Wood Sci.*, 48, pp.295~301.
- Lee, D.G. Cho, S.H. Park, C.H.** (2004) The Analytical Model Considering the Deformation of Panel Zone with Linear Element, *Conf. Proc. Korea Comput. Struct. Eng.*, 17, pp.293~300.
- Schneider, S.P., Amidi, A.** (1998) Seismic Behavior of Steel Frames with Deformable Panel Zones, *J. Struct. Eng.*, 124, pp.35~42.
- Shim, N.H., Kim, D.K., Park, Y.S.** (2012) An Experimental Study for Structural Performance Evaluation of Timber Truss Bridge, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 60, pp.56~66.
- Smith, I., Asiz, A., Snow, M.** (2006) Design Method for Connections in Engineered Wood Structures, Faculty of Forestry and Environmental Management University of New Brunswick, Fredericton, pp.58~66.
- Tsai, K.C., Popov, E.P.** (1990) Seismic Panel Zone Design Effect on Elastic Story Drift in Steel Frames, *J. Struct. Eng.*, 116, pp.3285~3301.

요 지

현대 목조 구조물은 일반적으로 접합철물인 연결재를 이용하여 접합된다. 그리고 목조 구조물에서 다수의 연결재를 사용한 접합부는 반강접 접합부를 만든다. 목조 구조물에 접합부가 편접합으로 설계될 경우에 접합부를 통해 전달되는 하중이 과소 평가되고 이것은 접합부의 저항능력 부족을 초래한다. 목조 구조물의 접합부를 완전 강접합으로 고려할 경우에 접합에 필요한 접합철물의 양이 과도하게 증가 할 수 있다. 이것은 미적인 요소 뿐만 아니라 시공성과 경제성을 저하시킨다. 접합부의 합리적인 강성에 대한 추정은 목조 구조물의 합리적인 접합부의 설계에 필수적인 요소이다. 이 논문은 목조 구조물의 구조설계를 쉽게 수행할 수 있도록 도움을 주기 위하여 2면 전단접합에 대하여 구조설계에서 널리 이용되는 상용 프로그램을 사용하여 접합부의 근사적인 강성을 나타낼 수 있는 해석 모델링 기법을 제안한다. 제안된 근사해석 모델링 기법은 휨 모멘트, 인장에 대한 실험 결과와 해석결과를 비교하여 접합부의 거동을 나타낼 수 있다는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 2면 전단, 목재, 반강접 접합부, 근사해석모델