Journal of The Korea Institute of Building Construction
Vol. 24, No. 3, pp. 331-341 / June, 2024
https://doi.org/10.5345/JKIBC.2024.24.3.331

pISSN 1598-2033
eISSN 2233-5706
www.jkibc.org

Research Paper

C형 강재-목재 합성보의 휨성능 평가에 관한 실험 연구

An Experimental Study on Flexural Performance Evaluation of C-Shaped Steel-Timber Composite Beams

오근영[1] · 이상섭[2]* · 박금성[3] · 부윤섭[4]
Oh, Keunyeong[1] · Lee, Sang-Sup[2]* · Park, Keum-Sung[3] · Boo, Yoon-Seob[4]

[1]Senior Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do, 10223, Korea
[2]Research Fellow, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do, 10223, Korea
[3]Senior Research Fellow, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do, 10223, Korea
[4]Research Specialist, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

*Corresponding author
Lee, Sang-Sup
Tel : 82-31-910-0768
E-mail : lss0371@kict.re.kr

Received : February 6, 2024
Revised : April 11, 2024
Accepted : May 2, 2024

ABSTRACT

In this study, the flexural strength and ductility of steel-timber composite beams were evaluated to enhance the structural performance of glued-laminated timber beams. Three specimens were fabricated, including one reference glulam beam and two composite beams. The composite beams were constructed by attaching steel sections to the glulam beam using either liquid adhesive or screws. The experimental results showed that the structural performance of the steel-timber composite beams was approximately 2-3 times higher than the reference glulam beam, indicating that both flexural strength and ductility were sufficiently ensured. Notably, the specimen constructed with liquid adhesive demonstrated superior structural performance compared to the screw-attached specimen.

Keywords : c-shaped steel, glued-laminated timber, composite beam, flexural performance

1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화에 대한 환경문제에 대응하기 위하여 기존 건설 재료인 철근콘크리트 및 강재를 벗어나 공학용 목재를 활용한 건축물의 건설 시도가 활발히 진행 중이다. 목재는 친환경 건축재료로서 지속가능한 자원이며, 이산화탄소를 저장할 수 있어 탄소저감에 가장 효율적인 건설재료 중 하나이다. 이러한 장점을 지닌 목재를 기반으로 집성 방법에 따라 공학용 목재를 생산하고 있으며, 공학용 목재는 구조용 집성재(glued-laminated timber, GLT), 교차 집성판(cross-laminated timber, CLT)과 단판 적층재(laminated veneer lumber, LVL) 등이 있고 이들을 활용한 고층 목조 건축물들이 전 세계적으로 축조되거나 축조 계획을 가지고 있다[1].

이전 목조 건축물은 건축물의 규모가 크지 않아 제재목 및 OSB(oriented strand board) 합판 등을 활용하여 건설하는 경우가 많았으며, 중형 이상의 목조 건축물에서는 공학용 목재를 사용하였다. 그러나, 점차 목조 건축물의 규모가 고층화 및 대형화가 되면서 공학용 목재가 지닌 강도만으로 구조설계가 어려워 공학용 목재의 부족한 휨강성 등을 보완하고자 강재 또는

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

섬유보강재를 접착제 또는 나사못 등을 활용하여 합성한 후 사용하는 경우가 증가하고 있다.

국외에서는 다양한 섬유보강재(fiber-reinforced plastic, FRP)를 활용하여 구조용 집성재 보의 휨성능을 확보하기 위한 연구를 수행하였다. Al-Katib et al.[2]와 Zhang et al.[3]은 탄소섬유시트(CFRP)를 구조용 집성재에 씌워 휨성능과 연성능력을 확보하기 위한 연구를 진행하였으며, Murakami et al.[4]은 CFRP 봉을 구조용 집성재 하부에 삽입하여 휨성능을 평가하였다. 섬유보강재 대신 Yoresta and Nugroho[5]는 냉간성형 강판(cold-formed steel plate)을 구조용 집성재 하부에 스크류를 이용하여 보강하였고, 냉간성형 강판의 보강 길이에 따른 휨성능 보강효과에 대한 실험연구를 진행하였다.

국내에서는 Jang et al.[6]의 연구에서 구조용 집성재 보, H형강 보 및 강재와 목재를 결합한 합성보에 대한 휨성능 평가를 위한 실험연구를 진행하였다. 강재와 목재를 결합한 합성보는 H형강 3면에 구조용 집성재를 상온 경화형 폴리우레탄수지를 활용한 표면접착방식을 이용하여 제작하였다. 실험체들은 동일 허용응력 기준으로 단면설계가 진행되었으며, 강재-목재 합성보는 H형강 보에 비해서 휨강성 및 휨강도가 모두 우수하였고 구조용 집성재 보에 비해서는 휨강성은 낮지만 휨강도는 우수하게 나타난 것으로 보고하였다. Kim and Yang[7]과 Kim et al.[8]은 목재 보 단면에 세로방향으로 슬릿(slit)을 내어 H형강 웨브 양쪽에 목재 부재가 삽입되도록 단면을 구성하였으며, H형강과 목재 보 사이의 접착 방식에 따른 휨성능을 평가하였고, 실험결과를 바탕으로 골조를 제작하여 골조 내에 가새, 황토벽돌, ALC 블록으로 보강하여 이에 따른 구조성능을 평가하였다. H형강과 목재 보 사이에 접착 방식은 에폭시를 사용할 경우 휨성능이 우수한 것으로 나타났으며, 이를 활용한 목조 골조에 ALC 블록을 전면 채운 실험체가 다른 보강 형식에 비하여 초기강성, 내력 및 에너지흡수능력 등이 우수한 것으로 보고하였다. 또한, Park et al.[9]와 Park et al.[10]은 목재-강재 합성 부재의 전단부착 성능 및 강판을 보강한 구조용 집성재 보의 휨성능을 평가하였다. 이때 강재와 보는 폴리우레탄 계열 접착제를 사용하였으며, 특히 휨성능 평가 시 접착제의 문제로 보유 휨성능을 충분히 발휘되지 못한 것으로 보고하였다.

국내외에서 모두 구조용 집성재를 휨 부재로 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되었으나 구조용 집성재를 단독으로 휨 부재로 사용하기에 휨 및 연성능력이 부족하여 타 건축재료를 결합하여 이를 보완하고자 하였다. 그러나 선행연구 중 강재와 구조용 집성재를 결합하는 방식은 강재의 높은 강성으로 인하여 접착제의 부착력 상실로 탈락 현상이 발생하였으며[6-8], 섬유보강재를 이용한 결합 방식은 구조용 집성재 휨 성능 향상에 크게 기여하지 못한 경향을 보여주었다[2-4]. 또한, 스크류를 이용한 부착 방식의 경우 목재의 파단 발생 전 스크류의 탈락 또는 파괴로 인하여 목재와 보강재의 완전 합성 작용이 발생되지 못한 것으로 나타났다[5,9,10].

따라서 본 연구에서는 Park and Oh[1]에서 제안한 강재-목재 사이의 부착력을 높일 수 있는 액상형 접착제를 활용하여 절곡하여 제작한 C형상의 강재 내에 구조용 집성재를 결합한 합성보의 휨성능을 평가하고자 한다. H형강에 비하여 강성이 낮은 절곡하여 제작한 C형강의 강재를 이용하여 강재-목재 합성보를 구성하여 구조용 집성재의 강도 및 연성능력을 확보하고자 하였다. 강재-목재 합성보의 휨성능 평가 시 고려된 실험 변수는 강재-목재 사이의 부착 방법(액상형 접착제 또는 나사못)이며, 이 실험연구를 기반으로 강재-목재 합성보의 설계법 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 강재-목재 단면 성능 검토

2.1 설계 기본 가정

본 연구에서는 절곡하여 제작한 C형상의 강재와 목재 합성보의 휨성능을 평가하기 위하여 고려된 실험 변수로는 강재와 목재 사이의 부착 방법이다. 이를 위하여 실험체는 총 3개를 제작하였으며, 구조용 집성재만 있는 실험체와 강재-목재 합성보 부착 시 액상형 접착제 또는 나사못을 각각 적용한 실험체를 제작하였다. 실험연구 이전에 강재-목재 합성보의 공칭강도(M_n)와 강재-목재 합성보 사이의 필요한 전단력을 산출하고자 한다. 구조용 집성재의 단면 성능은 KS F 3021[11]과 KDS

41 50 10 목구조 재료 및 허용응력 기준[12]에 따라 산출하였다. 또한, 절곡하여 제작된 C형상의 강재는 KDS 41 30 10 건축물 강구조 설계기준[13]에 의거하여 단면성능을 산출하였다. 강재-목재 합성보는 완전 합성을 가정하여 선형탄성해석을 가정하여 공칭강도를 산출하였으며, 강재와 목재의 완전한 합성을 위한 전단 연결 설계는 강재-목재 사이에 작용하는 전단 흐름을 통해 계산된 수평 전단력으로 액상형 접착제의 부착강도를 검토하고 나사못 설계를 수행하였으며, 강재-목재 합성보의 휨성능 평가를 위한 합성보 단면 크기는 Figure 1에서와 같이 200×75mm로 설정하였다. 이때 C형상의 강재는 3.2mm 강판을 절곡하여 제작하였으며, 절곡부의 곡률(r)은 약 8 mm($2.5t$)가 되도록 하였다.

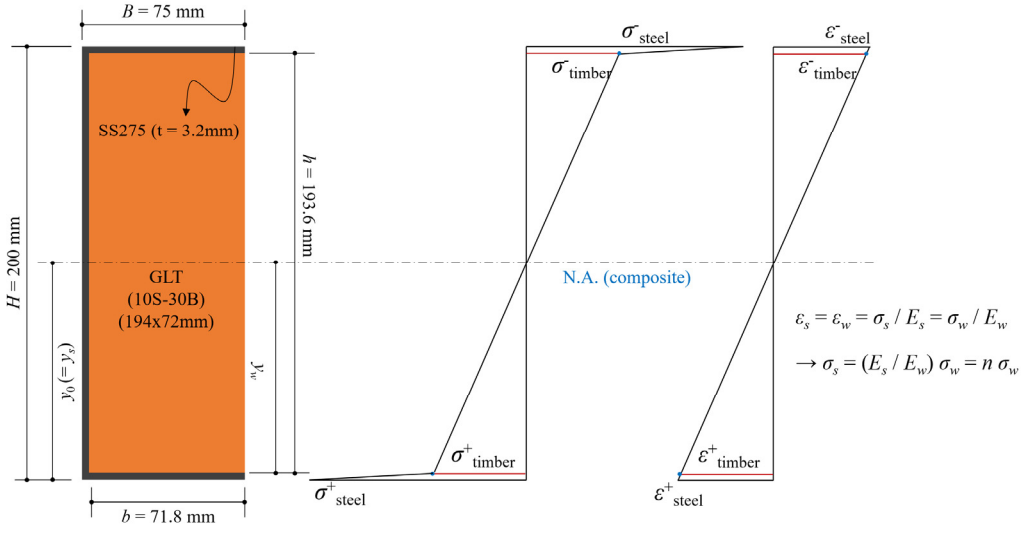


Figure 1. Cross section of C-shaped steel - timber composite beam

강재-목재 합성보에 사용된 구조용 집성재는 KS F 3021[11]에 따라 정의된 대칭 다른 등급 구성 집성재 중 강도등급 10S-30B를 선정하였으며, C형상의 강재는 SS275 강재를 사용하였다. 강재-목재 합성보 구현을 위하여 사용된 액상형 접착제는 Park and Oh[1]에서 제시한 액상형 접착제를 사용하였고, 나사못의 경우 S0850 FH 제품을 사용하였다. S0850 FH 나사못은 직경의 크기 4.2mm(#8)에 길이는 50mm인 제품이다. Table 1에서는 강재-목재 합성보에 적용된 재료의 기계적 성질을 정리하였다.

Table 1. Material properties of steel - timber composite beam

Material	Modulus of elasticity(MPa)	Yield or allow stress(MPa)	Adhesive or shear strength(MPa)
Steel	210,000	275(yield)	-
Timber	10,000	30(allow)	-
Adhesive	-	-	10.3(adhesive)
Screw	-	-	306.8(shear)

2.2 환산 단면2차모멘트 산정

강재-목재 합성보의 단면 성능에 따른 공칭휨강도(M_n)을 산출하기 위하여 복합 단면의 중립축과 환산 단면2차모멘트(I_{tr})를 산정하고자 한다. 복합 단면의 중립축은 Figure 1에서와 같이 휨을 받는 단면 축을 중심으로 대칭이기 때문에 중립축은 단면의 절반인 100mm에서 형성될 것이다. 환산 단면2차모멘트를 산정하기 위한 C 형상의 강재와 구조용 집성재의 단면2차모멘트는 각각 6.58×10^6mm^4, 43.42×10^6mm^{4}이다.

강재-목재 합성보의 환산 단면2차모멘트를 산출하기 위해서는 강재와 목재의 탄성계수비가 요구되며, 탄성계수비는 21 ($n = E_s/E_w = 210{,}000/10{,}000$)로 산출될 수 있다. 이를 기반으로 환산 단면2차모멘트는 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$I_{tr} = I_s + A_s(y_s - y_0)^2 + \frac{I_w}{n} + \frac{A_w}{n}(y_w - y_0)^2 = I_s + \frac{I_w}{n} = 8.65 \times 10^6 mm^4 \quad (1)$$

A_s : 강재의 단면적(mm^2)
A_w : 구조용 집성재의 단면적(mm^2)
E_s : 강재의 탄성계수(MPa)
E_w : 구조용 집성재의 탄성계수(MPa)
I_{tr} : 합성 단면의 환산 단면2차모멘트(mm^4)
n : 탄성계수 비
y_0 : 합성 단면의 중립축(mm)
y_s : 강재의 중립축(mm)
y_w : 구조용 집성재의 중립축(mm)

2.3 강재-목재 합성보 공칭 휨강도 산정

강재-목재 합성보는 완전합성으로 거동한다고 가정하였기 때문에 강재와 목재 사이의 경계면에서의 변형률은 같다. 이때 같은 위치에서 작용하는 응력은 탄성계수의 차이에 의하여 다른 응력 상태를 갖기 때문에 탄성계수 비를 Figure 1에서와 같이 적용할 수 있다. 또한, 선형탄성이론을 기본으로 하였기 때문에 강재-목재 합성보는 항복응력을 초과할 수 없고, ① 강재의 압축 또는 인장 및 ② 목재의 압축 또는 인장 등 2개의 한계상태에 의하여 공칭휨강도를 산출할 수 있다.

먼저 강재의 압축 또는 인장 시의 강재-목재 합성보의 휨강도는 1.13kN·m으며, 이때 응력은 강재와 목재의 항복(허용)응력을 넘어서진 않는다. 그러나, 목재의 압축 또는 인장 시의 휨강도는 2.68kN·m이며, 이때의 강재의 응력은 재료의 항복강도를 초과하여 선형탄성이론에 부합되지 않는다. 따라서 강재-목재 합성보의 최종 한계상태는 강재의 압축 또는 인장 시이며, 이때 강재-목재 합성보의 공칭휨강도($M_{n,c}$)는 Table 2에서와 같이 23.79kN·m로 산출될 수 있다. 또한, 실험 변수에서 강재와의 합성 없이 구조용 집성재만 있는 목재 보를 고려하고 있기 때문에 목재 보에 대한 공칭휨강도 산정이 필요하다. 구조용 집성재 보의 공칭휨강도는 13.46kN·m로 산출될 수 있다.

Table 2. Calculation of design strength

Material	Nominal flexural strength(kN·m)	Calculation
Timber beam ($M_{n,w}$)	13.46	$M_{n,w} = \sigma_w I_w / y_w = (30)(43.42 \times 10^6)/96.8$
Steel-timber composite beam ($M_{n,c}$)	23.79	$M_{n,c} = F_y I_{tr}/y_0 = (275)(8.65 \times 10^6)/100$
Condition ① ($M_{n,c1}$)	1.13	$M_{n,c1} = (F_y/n) I_{tr}/(H/2)$ $\sigma_s^{+,-} = (nM_{n,c1})(H/2)/I_{tr} = 274\,MPa \le 275MPa$ $\sigma_w^{+,-} = (M_{n,c1})(y_w)/I_{tr} = 12.65\,MPa < 30MPa$
Condition ② ($M_{n,c2}$)	2.68	$M_{n,c2} = (\sigma_w I_{tr})/(y_w)$ $\sigma_s^{+,-} = (nM_{n,c2})(H/2)/(I_{tr}) = 650.6\,MPa > 275MPa \cdots N.G.$ $\sigma_w^{+,-} = (M_{n,c2})(y_w)/(I_{tr}) = 30\,MPa \le 30MPa$

2.4 수평 전단력 산정 및 부착 방법 검토

강재-목재 합성보의 부착 방법에 따라 휨성능을 평가하기 위하여 먼저 수평전단력 산출을 통해 부착력을 검토하고 자 한다. 강재-목재 합성보 내 강재와 목재 사이에 발생하는 전단 흐름은 Figure 2와 식 (2), 식 (3)은 칭휨강도 작용 시 하중(P)을 산출하였다. 수평 전단력 산정 시 Figure 2에서의 하중(P)은 단순보 2점 가력에 의한 것으로 가정하였으며, 이때 실험체의 길이(L)는 1.8m로 가력점이 0.6m 간격으로 재하하는 상황으로 설정하였다. 이때, V는 설계 전단력, Q는 복합단면의 단면1차모멘트, 그리고 P_{yc}는 복합단면 단순보 2점 가력 시 전단력을 의미한다.

$$f = VQ/I = (P_{yc}/2I_{tr})(B)(t)(y_0 - t/2) = 5.15\,N/mm \tag{2}$$

$$P_{yc} = 6M_{n,c}/L = 3.77\,kN \tag{3}$$

강재와 목재 사이에 발생하는 수평 전단력은 경계면에서 작용하는 전단흐름과 전단력이 작용하는 길이의 곱으로 산출할 수 있고, 그 결과 식 (4)와 같다.

$$F_{sb} = 2 \times f \times L/3 = 6.18\,kN \tag{4}$$

Figure 2. Shear force distribution by shear flow

2.4.1 액상형 접착제 부착 강도 검토

강재와 목재 사이에 사용된 액상형 접착제는 에폭시 계열로 Park and Oh[1]에서 제안한 접착제를 사용하였다. 선행 연구에서 사용된 액상형 접착제는 퍼티형 접착제에 비하여 부착강도가 우수한 것으로 보고하였으며, 제조사에서 제공하는 부착강도는 약 10.3MPa인 것으로 나타났다. 접착제의 부착강도는 단위면적당 부착강도와 부착면적의 곱으로 산출할 수 있다. 식 (5)에서와 같이 액상형 접착제의 부착강도는 수평 전단력을 훨씬 상회하여 강재와 목재 사이의 완전한 합성 거동을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

$$F_b = 2f_bA_b = 2f_b(B \times L/3) = 887.45\,kN \; > \; 6.18\,kN \tag{5}$$

2.4.2 나사못 설계

강재-목재 합성보에서 강재와 목재를 결합하기 위한 또 다른 방법으로 나사못(screw)을 사용하였다. 나사못은 Table 1에서 제시된 나사못의 기계적 성질을 바탕으로 나사못의 개수 및 간격을 설계하였다. Table 1에서 제시된 나사못 1개의 전단력은 약 4.25kN으로 이를 수평 전단력으로 나눈 값은 약 1.45개로 산출된다. 전단력이 작용하는 구간에 2개만을 배치할 수 없

어 시공과 강판의 들뜸 등을 고려하여 플랜지 면에서는 200mm 간격으로 2열 배치하고, 웨브 면에서는 200mm 간격으로 3열 배치하는 것으로 나사못 개수 및 간격 등을 설계하였다. 플랜지 면에 설치한 나사못의 부착강도는 49.8kN으로 설계되어, 액상형 접착제를 사용한 부착강도의 약 5.6% 수준이다.

3. 휨성능평가 실험연구

3.1 실험 개요

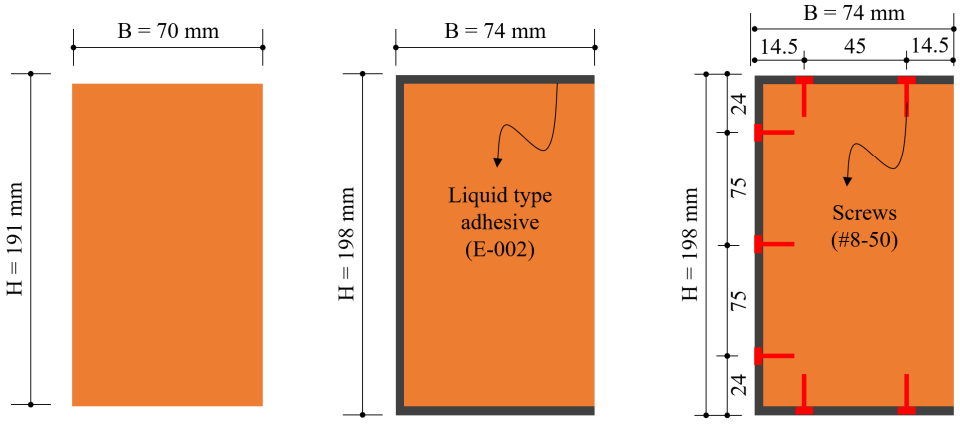
본 연구에서는 절곡하여 제작한 C형상의 강재와 목재 합성보의 부착방법에 따른 휨성능을 평가하기 위하여 실험체를 총 3개를 제작하였다. 액상형 접착제와 나사못을 이용한 합성보 실험체 2개와 구조용 집성재 보 1개를 제작하여 강재 합성에 따른 휨성능 및 연성능력 확보 등에 관한 효과를 확인하고자 한다.

실험체 단면은 Figure 1과 같이 절곡하여 제작된 C형상의 강재 내부에 구조용 집성재를 삽입한 형태이고, 합성 단면의 크기는 설계 시에는 200(높이)×75(폭)mm로 계획하였으나, 제작 상 여건 등을 고려하여 제작 단면 크기는 198(높이)×74(폭)mm이었다. 또한, 구조용 집성재 보 실험체의 경우에도 합성보 내의 구조용 집성재 크기와 동일하게 제작되어 실제 제작 크기는 191(높이)×70(폭)mm이다. 또한, 합성보 및 구조용 집성재 보의 길이는 2.0m로 제작되었으며, 순스팬의 길이는 1.8m로 설계하였다. Table 3에서는 실험체 일람에 대하여 정리하였으며, Figure 3에서는 단면 상세 및 접합 방법 등에 관하여 나타내었다.

Table 3. Matrix of specimens

Name	Timber properties	Steel properties	Cross section(mm)	Clear span length(mm)	Attachment
WB[a)]	10S－30B	－	191×70	1,800	－
CB-A[b),c)]	10S－30B	SS275(t=3.2)	198×74	1,800	Adhesive
CB-S[b),d)]	10S－30B	SS275(t=3.2)	198×74	1,800	Screws

Note. a) The WB means the wood beam.
b) The CB means the composite beam.
c) The A means the adhesive.
d) The S means the screws.



(a) WB (b) CB-A (c) CB-S

Figure 3. The shape and cross section of specimens

3.2 실험 방법

구조용 집성재 보 및 강재-목재 합성보의 휨성능을 평가하기 위하여 Figure 4와 같이 순스팬 1.8m 실험체를 제작하여 2점 집중 가력 방식으로 하중을 재하하였다. 지점과 하중점과의 간격은 600mm 간격으로 설정하였으며, 가력속도는 0.05mm/sec의 속도로 최대강도의 80%까지 가력하였다. Figure 4에서 우측은 CB-S 실험체의 나사못 배치를 나타내었으며, 나사못은 플랜지 면에는 2열 200mm 간격, 웨브 면에는 3열 200mm 간격으로 배치하였다.

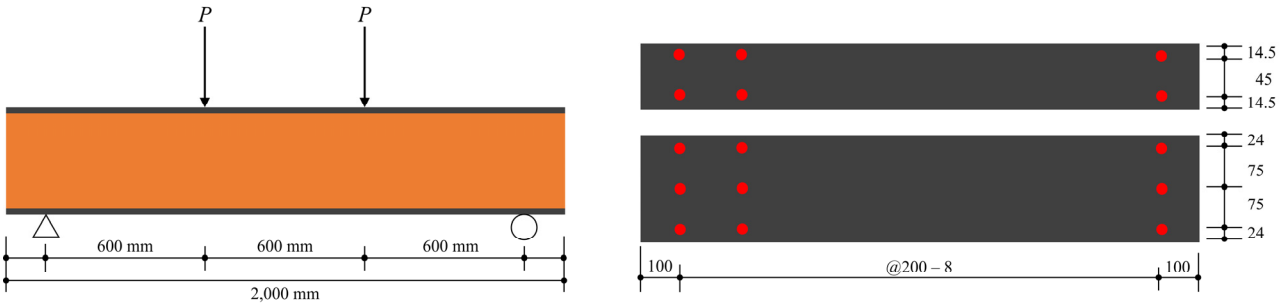


Figure 4. Experimental setup and screws arrangement for CB-S specimen

구조용 집성재 보 및 합성보의 처짐량을 측정하기 위하여 총 3개의 변위계(LVDT)를 실험체 중앙부 및 가력 지점에 설치하였다. 또한, 보의 상하부와 측면에서 발생되는 변형율을 측정하기 위하여 스트레인게이지를 설치하여 변형율 측정을 통해 합성보의 합성 여부와 변형율 분포 등을 관찰하고자 하였다. Figure 5에는 변위계와 스트레인게이지 설치 현황을 나타내었다.

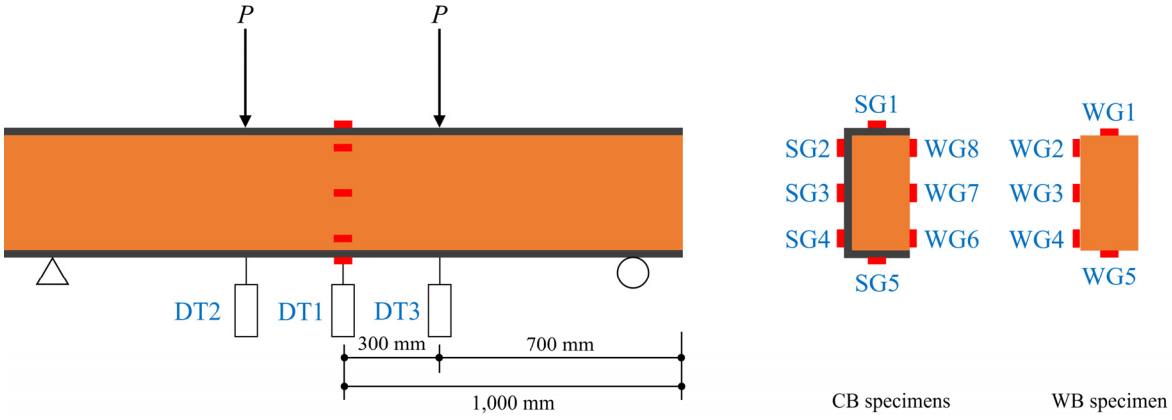
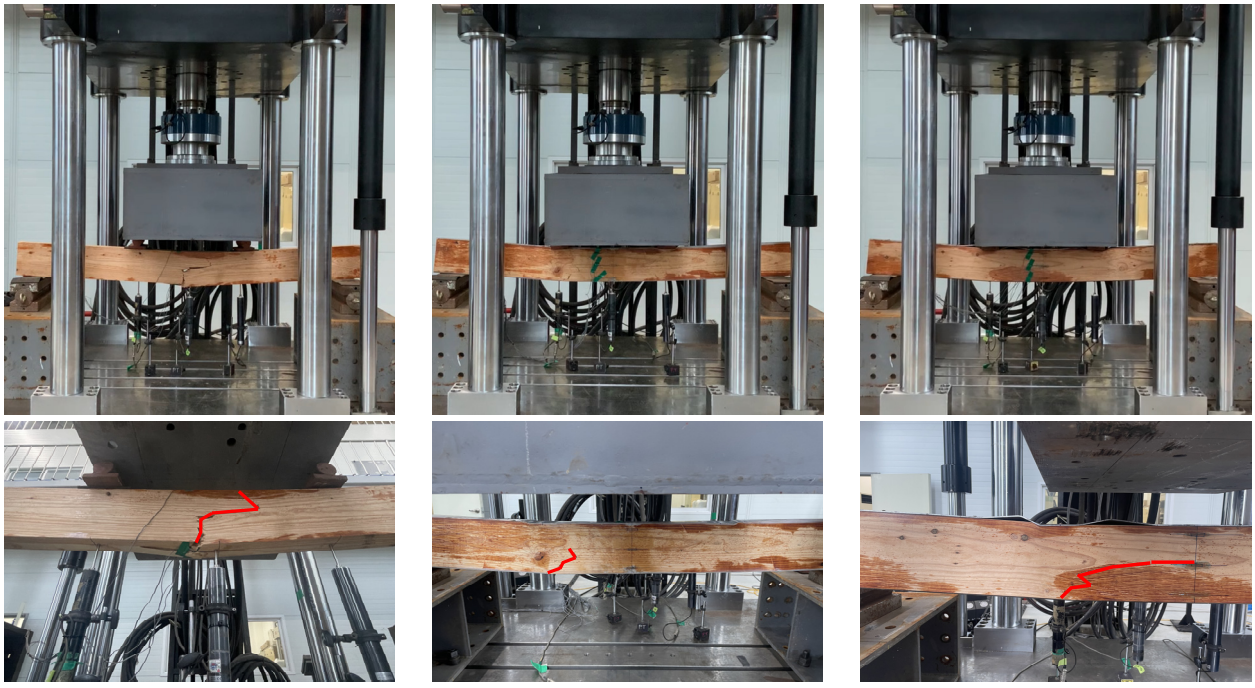


Figure 5. Measurement plan

3.3 실험 결과

WB 실험체의 경우 구조용 집성재만 있는 보 실험체로서 측정 변위 약 18mm에서 최대강도 약 57kN으로 측정되었으며, 최대강도 이후 가력 지점 중앙부에서 목재 파단이 발생하면서 급격한 취성파괴 현상을 보여주었다. 접착제를 이용하여 강재와 목재를 합성한 CB-A 실험체의 경우에는 가력점 위치에서 지압에 의한 강재의 국부변형이 먼저 발생하였으며, 그 이후에는 휨변형이 증가하면서 측정변위 약 33mm에서 최대강도 약 123kN가 측정되었다. 최종적으로 실험체 좌측 가력점 위치

목재 하부에서 휨변형에 의한 목재 파단이 관찰되었다. 나사못을 이용하여 부착한 CB-S 실험체의 경우에는 CB-A 실험체와 마찬가지로 가력점 위치에서 지압에 의한 강재 국부변형이 발생하였고, 측정된 최대강도는 측정변위 약 25mm에서 약 106kN로 측정되었다. 이 실험체 경우에도 실험체 좌측 목재 하부에서 목재 파단이 발생하였으며, Figure 6에 모든 실험체의 최종 종료 후의 모습을 나타내었다.



(a) WB specimen (b) CB-A specimen (c) CB-S specimen

Figure 6. The failure mode

3.4 실험 결과 분석

Table 4와 Figure 7에서는 구조용 집성재 보 및 강재-목재 합성보의 휨성능평가 실험 결과를 정리하였으며, Figure 7에서는 모든 실험체의 모멘트-변위 관계 곡선과 각 단면에서의 공칭휨강도를 함께 나타내었다. 먼저 구조용 집성재만 있는 WB 실험체의 경우, 항복점은 15.65kN·m, 14.97mm에서 산출되었으며, 최대강도는 약 17.03kN·m, 17.78mm에서 나타났다. 공칭휨강도에 비해서는 약 1.16배 높았으며, 연성비는 약 1.19로 나타났다.

강재-목재 합성보에서 먼저 액상형 접착제를 활용하여 부착한 CB-A 실험체의 초기 강성은 12.78kN/mm로 WB 실험체에 비하여 약 3배 이상이었으며, 항복강도과 최대강도는 각각 29.70kN·m과 37.13kN·m로 약 2배 정도 더 크게 발휘한 것으로 나타났다. CB-A 실험체는 공칭휨강도에 비하여 약 1.25배 높았으며, 연성비는 약 2.41로 나타났다. 나사못을 활용하여 강재와 목재를 합성한 CB-S 실험체의 경우에는 CB-A 실험체 비하여 초기강성, 항복강도 및 최대강도 모두 낮게 측정되었지만, WB 실험체 비해서는 1.5~1.8배 더 높은 것으로 측정되었다. 공칭휨강도에 비하여 약간 높은 수치만 보였지만, 연성비는 CB-A 실험체 비하여 약간 높은 수준을 보여주었다. 다른 수치들에 비하여 연성비만 높은 이유로는 나사못이 한꺼번에 부착력을 상실한 것이 아니라 순차적으로 파단이 발생되어 액상형 접착제를 사용한 것에 비하여 약간 높은 수치를 보여준 것으로 판단된다. 강재-목재 합성보는 목재 보에 비하여 휨강도와 연성능력이 확보된 것으로 나타났고, 액상형 접착제를 사용하였을 때 나사못에 비하여 더 우수한 구조성능을 보여주었다.

Table 4. Summary of experimental test results

Name	Initial stiffness[a] (kN/mm)	Yield point[b]		Maximum point		M_y/M_n [c]	δ_{max}/δ_y
		M_y(kN·m)	δ_y(mm)	M_{max}(kN·m)	δ_{max}(mm)		
WB	4.18	15.65	14.97	17.03	17.78	1.16	1.19
CB-A	12.78	29.70	13.75	37.13	33.09	1.25	2.41
CB-S	10.88	25.37	10.23	31.71	25.89	1.07	2.53

Note. a) The initial stiffness was calculated as a ratio of 40% and 70% of the maximum strength.
b) The yield point was defined as the point where the initial stiffness and 80% of the maximum strength meet.
c) The values of equations (11) and (12) were applied to the nominal flexural strength, respectively.

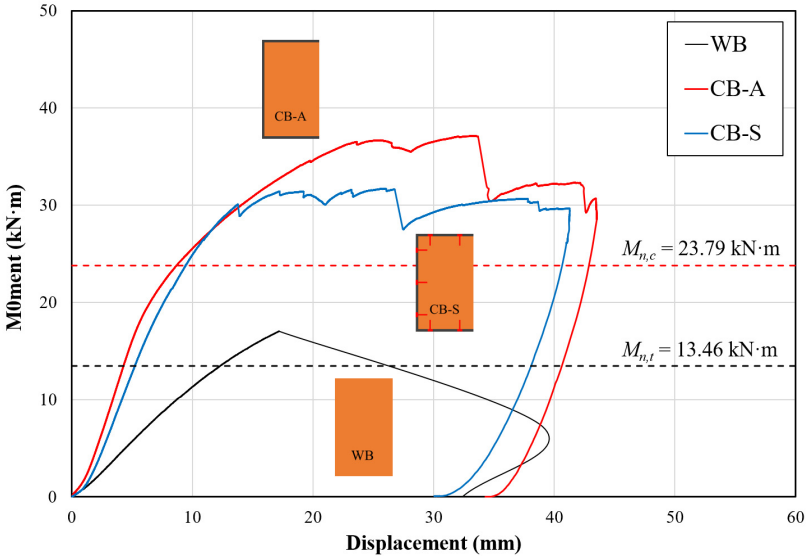
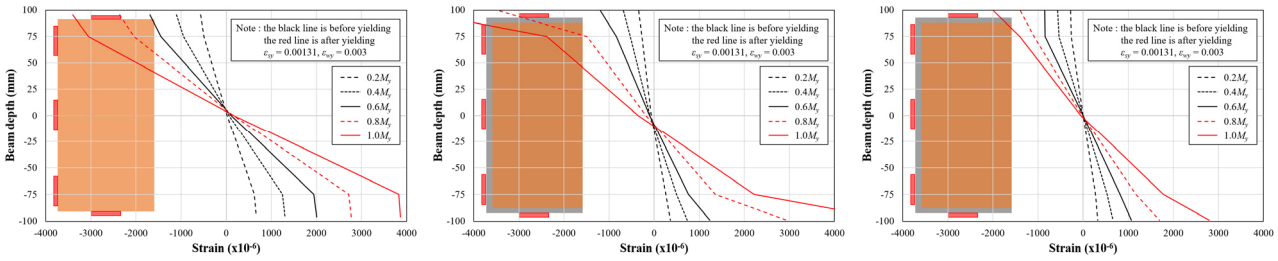


Figure 7. Moment - displacement relationship curves

하지만, 액상형 접착제 또는 나사못을 이용한 부착방법은 설계 시 모두 완전 합성이 되도록 설계가 되었으며, 이때 설계 부착강도는 액상형 접착제의 경우 887.45kN, 나사못의 경우 49.8kN으로 설계되었다. 나사못의 설계 부착강도가 액상형 접착제의 설계 부착강도의 약 6% 정도 수준임을 감안하였을 때, 초기강성, 항복점, 그리고 최대강도 등이 크게 차이가 나지 않아 나사못의 개수 및 간격 등을 조정하였을 때 구조성능이 향상될 것으로 판단된다.

3.5 변형율 분포

Figure 8에서는 각 실험체별 하중에 따른 변형율 변화를 나타내었으며, 검정색 선의 경우 각 실험체의 항복강도 이전이고 붉은색 선은 항복강도 이후의 변형율을 나타내었다. 먼저 모든 실험체의 중립축은 보 춤의 중심선을 기준으로 형성되어 있었고 항복 이전에는 선형적인 기울기를 보이다가 항복 이후에는 단부에서 변형율이 집중되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 강재-목재 합성보인 CB-A 실험체와 CB-S 실험체의 경우 항복 이후 단부에서 변형율이 커지는 현상이 발생하였는데, 이는 가력 시 가력점에서 지압으로 인하여 강재의 국부 변형이 선행되어 나타난 현상인 것으로 판단된다. 또한, 항복강도 이후에 단부의 변형율은 강재의 항복 변형율을 넘어서고 있지만, 목재의 경우에는 아직 탄성상태에 머물러 있는 것으로 나타났다. 강재-목재 합성보는 탄성 범위 내에서 변형율 분포가 거의 선형적으로 분포하여 완전 합성보에 가까운 거동을 보여줌을 확인할 수 있었다.



(a) WB specimen (b) CB-A specimen (c) CB-S specimen

Figure 8. Strain distribution

4. 결 론

본 연구에서는 구조용 집성재 보의 휨강도 및 연성능력을 확보하고자 절곡하여 제작한 C형상의 강재의 강재와 목재를 결합한 합성보의 휨성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 강재-목재 합성보는 구조용 집성재 보에 비하여 초기강성, 항복강도 및 최대강도가 약 2~3배 더 우수한 것으로 나타났다. 또한, 강재-목재 합성보는 구조용 집성재 보에 비하여 연성비가 약 2배 더 높아 강재-목재 합성보는 휨강도 및 연성능력을 더 확보할 수 있음을 확인하였다.
2) 강재-목재 합성보의 부착방법에 따라 액상형 접착제를 사용한 실험체는 공칭휨강도에 비하여 약 25%가 더 높았으며, 나사못을 사용한 실험체는 약 7% 상승하였다. 연성비의 경우에는 부착 방법에 따라 뚜렷한 큰 차이가 없어 강재-목재 합성보 시 부착 방법은 액상형 접착제를 사용하는 것이 구조성능이 더 유리한 것으로 나타났다.
3) C형강의 강재와 목재의 합성보의 휨성능 평가를 통하여 액상형 접착제를 통한 완전 합성 거동을 확인하였으나, 휨성능 평가 시 C형강의 형상으로 편심이 발생하여 목재의 최외단에 강재를 부착한 합성보의 구조성능 평가가 필요하리라 판단된다.
4) 본 연구에서는 목재의 구조적 성능을 향상하고자 강재와 합성보를 구성할 때 사용한 액상형 접착제의 경우 주성분이 에폭시 수지이고 목재의 친환경성 등을 고려하고자 하였을 때는 적합하지 않을 수 있다. 추후 친환경 소재의 접착제 등을 사용한 강재-목재 합성보의 구조적 성능을 재검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

요 약

본 연구에서는 구조용 집성재 보의 휨강도 및 연성능력을 보완하고자 강재-목재 합성보의 휨성능을 평가하였다. 실험체는 구조용 집성재 보 1식과 강재-목재 합성보 2식으로 구성하였다. 강재-목재 합성보는 부착 방법에 따라 액상형 접착제와 나사못을 사용하여 휨성능을 평가하였다. 실험결과, 강재-목재 합성보는 구조용 집성재 보에 비하여 구조성능이 약 2~3배 높아 휨강도 및 연성능력이 충분히 확보된 것으로 나타났다. 또한, 액상형 접착제를 사용한 경우가 나사못을 적용한 실험체에 비하여 우수한 구조성능을 보여주었다.

키워드 : C형 강재, 구조용 집성재, 합성보, 휨성능

Funding

Not applicable

Acknowledgement

Research for this paper was carried out under the KICT Research Program(project no. 20240061-001) funded by the Ministry of Science and ICT.

ORCID

Keunyeong Oh, https://orcid.org/0000-0002-4825-7070

Sang-Sup Lee, https://orcid.org/0000-0002-8583-2628

Keum-Sung Park, https://orcid.org/0000-0001-9009-7616

Yoon-Seob Boo, https://orcid.org/0000-0002-6253-0088

References

1. Park KS, Oh K. Experimental study on pull-out strength of glued-in rods connection according to adhesive. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2022 Apr;22(2):149-60. https://doi.org/10.5345/JKIBC.2022.22.2.149
2. Al-Katib HA, Alkhudery HH, Al-Tameemi HA. Structural behavior of standard timer beams strengthened using CFRP sheet. Asian Journal of Civil Engineering. 2022 May;23:727-39. https://doi.org/10.1007/s42107-022-00452-w
3. Zhang C, Chun Q, Wang H, Shi J. Experimental study on the flexural behaviour of timber beams strengthened with high ductility and low cost hybrid fibre sheets. Construction and Building Materials. 2022 Mar;322:126514. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126514
4. Murakami K, Satoh A, Takeda K, Yamauchi S. Flexural Reinforcing Effect of Timber Beam by Embedding CFRP Rod. AIJ Journal of Technology and Design. 2022 Jun;28(69):580-4. https://doi.org/10.3130/aijt.28.580
5. Yoresta FS, Nugroho N. Strengthening of timber beam with cold-formed steel plates. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology. 2023 Feb;14(1):306-14. https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.01.028
6. Jang SS, Kim YH, Jang YI. Mechanical properties of composite materials composed of structural steel and structural glued laminated timber. Journal of the Korean Wood Science and Technology. 2009 Jan;37(4):300-9.
7. Kim SC, Yang IS. Experimental Study on Joints of Flexural Member Consisting Structural Laminated Timber with H-beam in Wooden Structure. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2006 Apr;22(4):95-102.
8. Kim SC, An HJ, Yang IS. Structural performance by strengthening types of wood frames with joints consisted of structural laminated timber and steel member. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2008 Mar;24(3):19-26.
9. Park KS, Lee SS, Kwak MK. Experimental evaluation of shear bonding performance of wood-steel composite members. Journal of the Korean Association for Spatial Structures. 2019 Dec;19(4):53-60. https://dx.doi.org/10.9712/KASS.2019.19.4.53
10. Park KS, Lee SS, Kwak MK. Evaluation on flexural performance of steel plate reinforced GLT beams. Journal of the Korean Association for Spatial Structures. 2020 Jun;20(2):39-49. https://dx.doi.org/10.9712/KASS.2020.20.2.39
11. KS F 3021. Structural glued laminated timber. Eumseong (Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2018. 19 p.
12. KDS 41 50 10. Timber structure materials and allowable stress. Goyang (Korea): Korea Construction Standards Center; 2022. 1-13 p.
13. KDS 41 30 10. Steel structure design standards for buildings. Goyang (Korea): Korea Construction Standards Center; 2022. 13-16 p.