CuAz-3처리 리기다소나무 제재목을 이용한 구조용 집성재 성능 평가*¹

김 광 모*^{2†} · 엄 창 득*² · 이 상 준*²

Performance of Structural Glulam Laminated with CuAz-3 Preservative Treated Lumber*¹

Kwang-Mo Kim*^{2†} · Chang-Deuk Eom*² · Sang-Joon Lee*²

요 약

구조용 집성재의 시장 수요가 확대되고 다양화되면서 교량이나 파고라와 같이 외기에 노출되는 조건에서 사용하기 위한 고 내구성 구조용 집성재에 대한 시장 요구가 증가할 것으로 예견된다. 따라서 본 연구는 국산 침엽 수재로 제조되는 구조용 집성재에 적합한 방부처리 기술 및 기준을 개발하기 위한 목적으로 진행되었다. 본 연구에서는 방부처리된 국산 리기다소나무 제재목을 이용하여 구조용 집성재를 제조하고 제조 단계별 생산수율과 KS 품질기준 충족여부를 평가하였다. 방부집성재의 제조수율은 일반 집성재와 큰 차이를 나타내지 않았으며, 목재자원의 효율적인 활용을 위해서는 집성재 제조수율 향상방안과 함께 부산물에 대한 효율적 활용방안도 함께 검토되어야 한다. 리기다소나무 방부처리재의 경우 불균일한 방부약제 흡수량으로 인하여 구조용 집성재 제조용으로 적합하지 않은 것으로 확인되었으며, 집성재 제조 후에 유용성 방부제를 처리하는 방안에 대한 추가적인 검토가 요구되었다.

ABSTRACT

Nowadays, market demand of structural Glulam is growing and diversifying. The durability of Glulam should be significantly considered when they are intended to apply for out-door use such as timber bridge and pergola. This study was aimed to develop the manufacturing process of preservative treated structural Glulam using domestic softwood species. 10 m long structural

*¹ 접수 2011년 10월 14일, 채택 2011년 11월 18일

*² 국립산림과학원 녹색자원이용부 재료공학과, Division of Wood Engineering, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김광모(e-mail: lovewood@forest.go.kr)

Glulam were manufactured from domestic pitch pine logs with CuAz-3 preservative treatment. At each manufacturing process, the production yield was evaluated. Finally, bending tests were performed to verify the structural performance of manufactured Glulam. From the results, it was shown that the preservative treatment process hardly influenced on the production yield. But domestic pitch pine was proved to not be suitable for making the preservative treated Glulam due to the large difference of preservative permeability between sapwood and heartwood.

Keywords: Glued laminated timber, durability, CuAz-3, production yield, bending strength

1. 서 론

구조용 집성재는 단면이 작은 제재목으로부터 생산되기 때문에 건조가 쉽고, 대단면 장스팬의 구조부재 생산이 가능하며, 공학적인 부재 설계과정으로 성능의 변이가 적고 예측이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 최근 국내에서는 목조건축의 수요가 소형 주택에서 강당이나 교량, 공공건축물과 같은 대형 시설물로 확대/다변화되고 있으며, 이에 따라 구조용 집성재의 수요도 급격하게 증가할 것으로 예상된다. 따라서 업계에서는 새롭게 구조용 집성재 생산시설을 갖추거나 기존 수장용 집성재 생산시설을 구조용 집성재 생산이 가능하도록 전환하는 시도가 계획 또는 진행 중에 있다.

구조용 집성재를 교량이나 파고라와 같이 외기에 노출되는 조건에서 사용하기 위해서는 방부처리 등을 통해 높은 수준의 내구성이 확보되어야 한다. 구조용 집성재의 사용이 보편화된 외국의 경우 구조용 집성재의 방부처리방법에는 방부처리된 제재목을 집성하거나 집성재를 제조한 후에 방부약제로 처리하는 두 가지 방법이 모두 사용되고 있으며, 방부처리 약제의 종류와 사용되는 제재목의 수종에 따라 적용 가능한 방법이 관련 기준에 제시되어 있다(AITC, 2007; APA EWS, 2006). 그러나 국내에서는 아직 이와 관련된 구체적인 연구나 조사가 진행된 바 없어 소비자의 요구가 있는 경우에 별도의 기준 없이 외국 사례를 참고하여 일부 생산하는데 그치고 있으며, 생산된 부재의 품질에 대한 검증은 이루어지고 있지 못하는 실정이다. 따라서 향후 증가될 것으로 예상되는 시장 수요를 대비하기 위하여 구조용 방부 집성재 제

조에 관한 적합한 처리기준과 품질관리 제도의 마련이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구는 국산 침엽수재로 제조되는 구조용 집성재에 적합한 방부처리 기술 및 기준을 개발하는 것을 목적으로 계획되었다.

실제 크기로 제조된 집성재를 집성 후에 유용성 방부약제로 처리할 수 있는 시설이 국내에는 아직 갖춰져 있지 않기 때문에 본 연구에서는 현재 국내에서 테크나 조경용재로 많이 이용되고 있는 CuAz, ACQ 등의 수용성 방부약제로 처리된 방부목재를 이용하여 구조용 집성재를 제조하는 방안을 검토하였다. 리기다소나무 소시편을 대상으로 진행한 선행연구를 통해 사용환경범주 H3 (국립산림과학원 고시 2009-07) 기준으로 CuAz이나 ACQ, CuHDO 등의 수용성 방부약제를 처리한 목재의 경우 구조용 집성재 제조에 적합한 전단접착력 및 접착내구성이 발현되며, 방부처리된 목재의 접착성능은 처리약제의 종류보다는 방부처리에 의해 목재 내부에 잔류되는 산화구리(CuO)의 양에 의존하는 것으로 확인되었다(Kang *et al.*, 2011). 또한 집성재 제조시 길이접합에 주로 이용되는 핑거조인트의 성능도 무처리와 거의 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다(Lee *et al.*, 2011). 이상의 결과들을 바탕으로 본 연구에서는 방부처리 목재를 이용하여 실대 크기의 구조용 집성재를 제조하고, 생산된 방부 집성재가 KS F 3021-2005의 품질 기준을 만족하는지 여부를 확인하였다. 또한 방부처리된 구조용 집성재의 시장 경쟁력 확보 가능성을 평가하기 위한 기초 자료로써 제조 단계에 따른 수율 분석을 진행하고 그 결과를 함께 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구의 공시수종으로는 국내 입목축적량에 비해 활용가치가 낮게 평가되고 있으며, 비교적 방부처리가 용이한 리기다소나무(Pitch pine, *Pinus rigida* Mill.)를 선정하였다. 경기도 양평군 양동면 소재의 국유림에서 벌채된 리기다소나무 원목 중에서 말구 직경 21~29 cm, 길이 3.6 m의 통직한 원목 99개(20.3 m³)를 북부지방산림청 수원국유림관리소 양평경영팀으로부터 분양받아 사용하였다. 분양받은 원목은 산림조합중앙회 목재유통센터(경기도 여주)로 운반하여 50 × 150 mm 단면으로 제재한 후에 목표함수율 15%로 건조하였다.

제재목의 방부처리 약제로는 선행연구의 결과를 바탕으로 사용환경범주 H3 (국립산림과학원 고시 2009-07)를 기준으로 처리하였을 때, 상대적으로 목재 내에 잔류하는 산화구리의 함량이 적은 CuAz-3를 선정하였다(Kang *et al.*, 2011). 방부처리는 경기도 화성에 위치한 (주)중동에서 진행하였으며, 선정된 CuAz-3 방부약제를 가압식 주입처리 방법에 의해 사용환경범주 H3기준(흡수량 0.96 kg/m³ 이상)으로 처리하였다. 방부처리가 완료된 제재목은 다시 집성재 제조에 적합하도록 목표함수율 15%로 재건조하였다.

2.2. 집성재 제작

방부처리된 제재목의 집성은 강원도 화천군에 위치한 (재)화천군청정산업진흥재단에서 진행하였다. 먼저 모든 제재목을 43 × 148 mm 단면으로 4면 평삭하고 응력등급구분기(MGFE-251, IIDA KOGYO Co., Ltd)를 이용하여 휨탄성계수에 의한 제재목 기계응력등급을 구분하였다. 등급구분 과정에서 수피가 과도하게 포함된 제재목은 제외시켰다. 등급별로 분류된 제재목을 길이방향으로 핑거접합하여 길이 10.2 m의 층재를 제조하였다. 핑거접합에는 레조시놀 접착제가 사용되었으며, 길이접합과정에서 둥근모와 모인용이 지름비 50% 이상의 부분은 제거하였다. 길

이접합된 층재를 다시 40 × 145 mm 단면으로 4면 평삭하였는데, 과도한 뒤틀림 등으로 인하여 충분한 평삭이 이루어지지 않은 층재들은 다시 선별하여 두께 35 mm로 재 평삭하였다. KS F 3021의 대칭 다른등급 구성 집성재 강도등급 10S-30B와 9S-27B에 따라 12개의 층재를 배치하고 레조시놀 접착제를 이용하여 접착하였다. 접착제 도포량 및 압제압력은 리기다소나무를 대상으로 수행한 기존 연구결과를 바탕으로 250 g/m² (양면 도포)와 12 kg/cm²을 각각 적용하였다(김 등, 2007). 48시간 이상의 충분한 양생 후에 집성재의 양 측면을 폭 138 mm로 평삭하고, 길이는 10 m로 재단하였다. 최종적으로 강도등급 10S-30B와 9S-27B의 구조용 방부집성재를 각각 3개씩 제작하였다.

2.3. 휨시험

집성재 휨시험에는 대단면 구조부재의 휨/압축시험용 실험재 시험기(주문제작, 최대하중 2,000 kN, 삼덕 엔지니어링)가 이용되었다(Fig. 1). 지간 9,000 mm의 4점 하중 방식으로 실험하였으며, 하중점 사이의 거리는 2,000 mm로 하였다. 중앙부 변형 측정을 위하여 시편의 중앙에 RVDT (Rotary Variable Differential Transformer)를 설치한 상태에서 하중 속도 15 mm/min으로 파괴시까지 실험을 진행하고, 휨강도(MOR)와 휨탄성계수(MOE)를 아래의 식 (1)과 (2)를 이용하여 각각 계산하였다.

$$MOR (N/mm^2) = \frac{3P_{\max}a}{bh^2} \quad (1)$$

$$MOE (N/mm^2) = \frac{Pa}{4bh^3\Delta}(3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

여기서, $P_{\max}$ = 최대 하중(N),

P = 비례한도 하중(N),

Δ = 비례한도 변형(mm),

a = 지점과 하중점 사이의 거리(mm),

b = 집성재의 폭(mm),

h = 집성재의 깊이(mm),

L = 지점사이의 거리(mm).

Table 1. Production yield by Glulam manufacturing process

	Log	Sawn lumber	Graded lumber	Laminar	Glulam
Size	Ø210~290 mm × 3,600 mm	50 × 150 mm × 3,600 mm	43 × 148 mm × 3,600 mm	387 × 144 mm × 10,200 mm	138 × 467 mm × 10,000 mm
Number (EA)	99	327	271	79	6
Volume (m ³)	203	8.83	6.21	4.49	3.87
Yield (%)	100	43.5	30.6	22.1	19.1

Fig. 1. Bending test setup.

실험이 끝난 후에는 시편 중앙의 파괴가 가장 심하게 발생한 위치에서 시편을 채취하여 층별 방부약제 흡수량을 국립산림과학원고시 2006-04호에 따라 측정하였으며, 휨시험 과정에서 응력을 적게 받은 지점 부 주변에서 시편을 채취하여 KS F 3021-2005에 따라 블록전단시험과 침지 및 삶음박리실험을 실시하였다(Fig. 1).

3. 결과 및 고찰

3.1. 방부 집성재 제조 수율

각 제조 단계별 목재 양 및 원목 대비 생산수율을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 집성재 제조수율은 원목대비 20% 내외로 알려져 있으며, 본

연구에서 제조한 방부집성재의 경우에도 19.1%로 거의 유사한 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 방부 처리목재를 이용하여 구조용 집성재를 생산하는데 따른 생산수율의 변화여부와 그 원인을 확인하고자 하였다. 그러나 수율변화의 원인 중에서 방부처리에 의한 부분만을 정량적으로 분리하는 것은 매우 어려웠으며, 그 차이도 크지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 방부집성재의 생산과정에서 각 단계별로 발생하는 수율 저하 원인을 확인하고 해결방안을 제시하는 방향으로 연구의 초점을 맞추어 진행하였다.

20.3 m³의 원목으로부터 8.83 m³ (327개)의 제재목이 생산되어 제재수율은 43.5%로 나타났다. 그러나 수피를 과도하게 포함하고 있어 등급구분에서 제외시킨 제재목이 전체의 13% 이상(총 327개 중 43개)으로 이를 제외할 경우 제재수율은 37.8%로 감소하였다. 수피와 인접한 변재부의 경우 미성숙재가 많이 포함되는 심재부에 비해 비교적 강성이 우수하여 대체로 높은 기계응력등급의 제재목이 생산되는데, 이 부분이 등급구분 과정에서 제외됨에 따라 최종 집성재의 생산수율뿐만 아니라 생산 가능한 집성재의 강도등급도 저하시킨다. 따라서 집성재 제조를 위해 원목을 제재하는 경우에는 제재수율은 다소 낮아지더라도 가능한 수피가 포함되지 않도록 함으로써 최종 생산되는 집성재 생산수율과 강도등급을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 제재목에 수피가 부분적으로 포함되어 있는 경우에도 제재목의 기계응력등급을 낮추고 길이접합 과정에서 수피가 포함된 부분이 제거되어야 하므로 집성재 생산수율을 감소시키는 원인이 된다.

건조 및 방부처리가 완료된 총 327개의 제재목 중 수피가 과도하게 포함된 43개를 제외한 284개에 대해 기계응력등급을 구분한 결과를 Fig. 2에 나타내

Fig. 2. Grading results of sawn lumber.

었다. 비교를 위하여 그림에는 동일한 양평지역에서 벌채한 방부처리하지 않은 리기다소나무 제재목(38×140 mm)을 등급 구분한 이전 연구 결과를 함께 나타내었다(김 등, 2007). KS F 3021에 따르면 리기다소나무가 포함되는 수종군인 소나무류(수종군 B, 전 건비중 0.5이상, 0.55미만)의 경우 집성재의 최외층재로 사용될 수 있는 등급은 E11에서 E16까지이다. 등급구분 결과 E14 (1개)와 E16 (0개) 등급의 제재목은 거의 나타나지 않았으며, 따라서 최외층재에 E11과 E12등급을 사용하는 대칭 다른 등급 구성 집성재로 단면을 계획하였다.

최외층재에 E11 등급의 층재가 사용되는 대칭 다른 등급 구성 집성재의 강도등급은 9S-27B이며, 이 경우 각 층에는 Fig. 3에 제시된 등급 이상의 층재가 사용되어야 한다. 최외층재에 E12 등급의 층재가 사용되는 10S-30B에 대해서도 Fig. 3에 함께 나타내었다. KS에 따라 리기다소나무로 제조 가능한 대칭 다른 등급 구성 집성재 중 강도 등급이 가장 낮은 9S-27B의 경우에도 최소 E7 등급 이상의 층재가 사용되어야 함을 알 수 있다. 따라서 등급구분 과정에서 E5 (7개)와 E6 (6개)으로 구분된 제재목 13개는 집성재 제조에서 제외되었다.

제재 이후에 건조, 방부 등의 과정을 거쳐 등급구분을 완료하기까지 손실된 목재의 양은 약 2.62 m^3 으로 원목 대비 12.9%의 수율이 감소하였다. 그러나 등급구분에서 제외된 43개의 제재목에 의한 부분을 제외하면 손실된 목재의 양은 1.46 m^3 (원목 대비 7.19%)으로 감소하였다. 이중 건조수축 및 평삭에 의한 제재목 단면크기 변화로 감소하는 목재의 양이

Fig. 3. Laminar layout by strength grades of Glulam.

1.16 m^3 (원목 대비 5.71%)로 대부분을 차지하였으며, 낮은 기계응력등급(E6 이하)으로 인해 제외된 목재의 양은 0.30 m^3 (원목 대비 1.48%)로 크지 않았다.

등급구분이 완료된 제재목을 재료의 손실이 적으면서도 접합성능이 우수한 것으로 알려져 있는 핑거 조인트 방법(Lee et al., 2011)을 적용하여 길이 10.2 m의 층재를 제조하였다. 층재를 제조하는 과정에서 1.72 m^3 의 목재가 손실되어 원목대비 8.47%, 등급재 대비 27.7%의 수율감소가 발생하였다. 수율감소 원인을 보다 구체적으로 살펴보면 길이접합 과정에서의 길이 감소량이 1.08 m^3 (원목 대비 5.32%), 길이 접합 후 4면 평삭에 의한 감소량이 0.63 m^3 (원목 대비 3.18%)를 각각 차지하였다. 길이 감소는 대부분 부분적으로 포함되어 있는 등근모와 웅이를 제거하는 과정에서 발생하였다. KS F 3021에 따르면 기계응력등급으로 구분된 층재를 사용하는 경우 최외층재에서만 웅이 지름비 17%를 초과하는 웅이를 제외시키도록 되어 있으며, 육안식별 층재의 경우에는 등급에 따라 모인웅이 지름비를 최대 50%까지 허용하고 있다. 그러나 실제 생산현장에서는 기계응력등급 층재를 사용하면서도 외관적인 이유로 인하여 웅이(특히 가장자리에 웅이가 있는 경우)의 상당부분이 제거되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최대한 현장 조건과 일치시키기 위하여 육안식별층재 4 등급에 해당하는 모인웅이 지름비 50% 이상의 웅이 부분을 제거하였다. 현재 국내에서는 대부분의 집성

Table 2. Results of bending tests

	9S27B-1	9S27B-2	9S27B-3	KS criteria
Maximum Load(N)	62,460	79,400	114,300	-
MOE (N/mm ²)	12,114	11,288	11,817	9,000
MOR (N/mm ²)	22.43	28.06	40.39	25.1

Fig. 4. Volume ratio of each by-products during Glulam manufacturing process.

재가 건축물에 사용되면서 구조적인 역할과 함께 내외장재로서의 역할을 함께 담당하기 때문에 외관이 중요하게 고려되고 있지만 이 부분에 대해서는 기준에 명확하게 제시되어 있지 않다. 향후 구조용 집성재의 수요를 다양화시키기 위해서는 용도에 따른 외관등급을 기준에 포함시키고 구조성능이 우선시되는 낮은 외관등급의 경우 생산수율을 높여 가격경쟁력을 높이는 방안이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

층재로부터 집성재를 생산하는 과정에서 손실된 목재의 양은 0.62 m³으로 원목대비 3.05%의 수율감소가 발생하였다. 그러나 제조된 층재 79개 중 집성재 생산에는 72개(6 × 12개)만 사용되었으며, 사용되지 않은 층재(7개, 0.40 m³)도 동일 사양의 구조용 집성재 생산이 계속될 경우에는 충분히 활용될 수 있다. 따라서 실질적으로 손실된 목재의 양은 0.22 m³(원목대비 1.08%)에 불과하며, 구조용 집성재 시장의 표준화, 규격화를 통해 집성재 생산수율을 더 높일 수 있을 것으로 기대된다.

최종적으로 원목으로부터 구조용 집성재를 생산하는 과정에서 발생한 주·부산물과 원목용적에 대한

Fig. 5. Load-displacement curve of bending tests.

비율을 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. 구조용 집성재는 생산수율이 낮아 목재의 효율적인 활용방안이 되지 못하다는 관점도 일부 있으나, 생산 공정의 효율화와 관련 기준의 체계화를 통해 생산수율의 향상이 가능할 것으로 기대된다. 또한 생산과정에서 얻어지는 부산물인 제재 잔재, 낮은 등급의 제재목, 톱밥 등의 활용도 목재 자원의 효율적인 활용이라는 측면에서 함께 검토되어야 할 것이다.

3.2. 휨강도 및 휨탄성계수

제조된 집성재 중 강도등급 9S-27B의 3개 부재에 대해 휨시험한 하중-변형곡선을 Fig. 5에 나타내었다. Fig에서 변형은 강도시험기 크로스헤드의 변형을 나타내고 있으며, 휨탄성계수를 계산하는데 있어서는 시편 중앙에 설치한 RVD를 통해 측정된 값을 사용하였다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 세 시편 모두 휨강성이 유사하였으나, 파괴하중에 있어서는 두 배 가까운 차이를 보였다. 파괴 모드에 있어서는 세 시편 모두 탄성구간이 끝난 이후에 별도의 소성구간

(a) 9S27B-1

(b) 9S27B-2

(c) 9S27B-3

Fig. 6. Failed shape after bending test.

없이 바로 파괴되는 취성파괴(brittle fracture)의 양상을 보였다.

이상의 결과를 바탕으로 각 부재의 휨탄성계수(MOE)와 휨강도(MOR)를 계산하여 Table 2에 나타내었다. Table에는 KS F 3021에 제시되어 있는 강도 등급 9S-27B 집성재의 휨시험 합격기준을 함께 나타내었다. KS F 3021에 따르면 휨탄성계수는 모든 시험편의 평균값이 $9,000 \text{ N/mm}^2$ 이상이어야 하며, 전체 시험편의 95% 이상이 $8,000 \text{ N/mm}^2$ 이상인 경우를 합격으로 규정하고 있다. 본 실험 결과 세 시험편 모두 $11,000 \text{ N/mm}^2$ 이상으로 하한기준뿐만 아니라 평균

기준에 대해서도 30% 정도 상회하는 우수한 결과를 나타내었다. 휨강도의 경우에는 기준강도인 27 N/mm^2 에 집성재 두께에 따른 보정계수를 곱하여 합격기준이 결정되며, 전체 시험편의 95% 이상이 합격기준 이상이어야 한다. 본 연구 시험체의 보정계수는 0.93 (KS F 3021, 집성재 두께 450 mm 초과 600 mm 이하)이며, 따라서 휨강도 합격기준의 25.1 N/mm^2 이다. Table 2의 실험결과를 보면, 2와 3번 시험편의 경우 합격기준을 통과하였지만 1번 시험편의 경우 합격기준에 미달하였다.

휨시험이 끝난 직후에 각 시험편의 파괴 형태를 촬영한 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 실험대 시험기의 경우 지점을 부재의 위에 설치한 상태에서 아래에서 위로 하중을 가하면서 휨시험이 진행되기 때문에 사진에서 윗부분이 인장측 아래부분이 압축측이 된다(Fig. 1 참조). 파괴 양상을 보면 합격기준을 미달한 1번 시험편의 경우 다른 부분의 손상은 거의 없이 인장응력을 받은 10번과 11번 층재 사이를 따라 접착층 분리가 길게 발생하였으며, 12번 층재의 핑거조인트 부분이 빠지는 현상이 나타났다(Fig. 6a). 2번 시험편의 경우에는 파괴가 인장응력을 받은 중립축 이상의 상부 전반에 걸쳐 광범위하게 발생하였다. 그러나 파괴가 일어난 부분 중간에 접착층이 분리된 부분이 많이 관찰되었으며, 1번 시험편과 동일하게 12번 층재에서 핑거조인트가 빠진 부분이 나타났다(Fig. 6b). 가장 우수한 휨강도를 보인 3번 시험편의 경우, 파괴가 인장뿐만 아니라 압축응력을 받은 부분까지 전체적으로 넓게 나타났다. 그러나 이 경우에도 파괴 이후에 접착층과 핑거조인트의 분리가 일부 확인되었다(Fig. 6c).

방부처리목재를 포함한 제재목의 핑거접합부 인장 성능을 평가한 이전 연구에서 방부처리한 리기다소나무 제재목의 경우에도 비교적 우수한 성능이 확인되었다(Lee *et al.*, 2011). 본 연구와 이전 연구의 차이는 층재의 길이와 핑거접합부의 빈도를 들 수 있다. 기계를 이용하여 핑거접합한 직후에 층재를 이동시키게 되는데, 이 과정에서 충격이 가해지면 접합부 사이가 벌어져 접합성능이 저하될 우려가 있다. 특히 본 연구에서와 같이 층재의 길이가 긴 경우에는 부재

Table 3. Preservative retention for each layer

Layer	Preservative retention (kg/m ³)		
	9S27B-1	9S27B-2	9S27B-3
1	1.7	0.1	0.0
2	3.2	1.6	0.6
3	3.1	1.2	1.7
4	1.4	1.7	1.7
5	0.5	0.7	0.1
6	0.0	2.7	1.8
7	1.3	1.3	1.1
8	3.2	1.3	0.8
9	0.1	0.6	0.0
10	3.5	1.5	0.5
11	1.5	1.5	1.0
12	1.1	0.0	0.0
Average	1.72	1.18	0.78

* Separations were occurred between two adjacent shaded cells

자체의 무게만으로도 처짐이 크게 발생하기 때문에 더 세심한 주의가 필요하다. Fig. 7은 핑거접합부를 양생한 이후에 층재의 휨탄성계수를 검증하기 위하여 9.0 m 경간으로 설치한 모습인데, 자중에 의한 처짐이 크고 변이가 심하여 결과 도출이 불가능하였다. 핑거접합부의 빈도가 증가하면 이러한 문제의 발생 가능성 또한 증가할 것으로 생각된다. 따라서 집성재 생산과정에서 이러한 핑거접합부 불량률이 어느 정도 발생하는지가 확인되어야 하며, 결과에 따라 핑거접합 이후 층재의 관리방법 개선을 통해 집성재의 안정적인 성능확보 방안이 마련되어야 할 것으로 생각된다.

3.3. 휨강도 저하원인 분석

9S-27B 집성재의 휨강도가 기준에 미달함에 따라 동일한 과정으로 제조된 10S-30B 집성재의 휨시험은 의미가 크지 않을 것으로 판단되었다. 따라서 휨시험은 중단하고 휨강도 저하 원인을 확인하기 위하여 층별 방부약제 흡수량 측정과 접착층의 접착내구성 및 전단접착력 측정을 진행하였다. 방부약제 흡수량의 경우 전체 평균은 1.23 kg/m³로 목재의 방부·

Fig. 7. MOE measurement of 10.2 m length laminar (span 9.0 m).

방충처리 기준(국립산림과학원 고시 2009-07호)인 0.96 kg/m³을 만족하였으나, 변이계수가 80% 이상으로 편차가 매우 크게 나타났다(Table 3). 이는 각 층재의 심변재 차이에 기인하는 것으로 생각되며, 리기 다소나무 변재의 경우 방부약제 주입이 원활하게 이루어지는 반면에 심재는 약제가 거의 침투하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 소시편에서와 달리 심변재 제어가 어려운 실대재의 경우에는 전체적으로 균일한 흡수량으로 방부처리하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.

전반적으로 집성재의 방부약제 흡수량과 휨강도는 정반대의 경향을 나타내었다. 높은 휨강도를 나타낸 3번 집성재의 경우 평균 흡수량(0.78 kg/m³)이 기준에 미달한 반면에, 휨강도 기준에 미달한 1번 집성재의 경우에는 오히려 기준의 2배 가까운 흡수량(1.72 kg/m³)을 보였다. 이는 흡수량이 높은 층재 부분의 접착성능이 불량하여 낮은 응력에서 접착층 분리가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. Table 3에는 휨시험 과정에서 접착층 분리가 발생한 위치의 층재 부분을 음영으로 표시하였는데, 전반적으로 흡수량이 높은 위치에서 접착층 분리가 발생하였음을 확인할 수 있다. Kang *et al.* (2011)은 방부약제 흡수량이 증가하는 경우 레조시놀 접착제를 사용한 접착성능이 현저히 감소한다고 보고한 바 있다. 1, 2번 집성재의 경우 파괴가 일어나지 않은 압축측에서 일부 흡수량이 높은 부분이 나타나기도 하지만 이는 파괴가 너무 조기에 발생함에 따라 전체적으로 충분한 응력이 가해지지 못하였기 때문으로 생각된다.

방부약제가 불균일하게 처리됨에 따른 접착성능 저하는 Table 4의 전단접착력 및 접착내구성 측정 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 블록전단실험을 통한

Table 4. Test results of block shear and durability of bonded layer

		9S27B-1	9S27B-2	9S27B-3	KS criteria
Shear bond strength (N/mm ²)		595	641	673	over 7.1
Wood failure (%)		67.8	77.3	80.6	over 65
Delamination ratio of bonded layer (%)	cold water	3.66	5.21	1.58	up to 5
	boiling water	3.77	2.41	1.17	up to 5

Fig. 8. Example of delamination after soaking in boiling water (9S27B-3).

전단접착력 측정 결과 목파율은 대부분 기준을 통과하였으나, 전단접착력은 KS기준에 미달하는 것으로 확인되었다. 접착내구성의 경우에 2번 집성재의 침지박리율을 제외하고 평균 박리율은 모두 기준을 통과하였으나, 하나의 층재에 나타나는 박리길이의 제한 규정(1/4이하)에 의해 전체 12개의 시편(침지박리 6개, 삶음박리 6개) 중 5개가 기준에 미달하는 것으로 확인되었다(Fig. 8).

이상의 결과를 바탕으로 심변재의 방부약제 흡수량 차이가 큰 리기다소나무의 경우에는 수용성 방부약제를 처리한 후에 구조용 집성재로 제조하는 방법의 적용이 어려울 것으로 판단하였다. 전체적인 방부약제의 주입량을 줄이면 접착성능은 향상시킬 수도 있을 것으로 생각되지만, 이 경우 목재의 방부·방충처리 기준(국립산림과학원 고시 2009-07호)에 미달하여 필요한 용도로의 활용이 곤란하다. 따라서 리기다소나무 구조용 집성재의 내구성을 높이기 위해서는 집성재로 제조한 이후에 유용성 방부제를 처리하는 방법에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

방부처리된 국산 리기다소나무 제재목을 이용하여

구조용 집성재를 제조하고 제조 단계별 생산수율과 KS 품질기준 충족여부를 평가한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 원목으로부터 구조용 방부집성재를 생산하는데 있어 최종 제조수율은 19.1%로 나타났으며, 원목의 제재 단계부터 생산공정을 효율화하고 관련 기준을 현실에 맞도록 보완함으로써 제조수율의 향상이 가능할 것으로 기대되었다.

2) 구조용 집성재의 수요 확대와 함께 목재 자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 집성재 생산과정에서 부산물로 얻어지는 제재 잔재, 낮은 등급의 제재목, 톱밥 등의 활용 방안이 함께 검토되어야 한다.

3) 휨시험 과정에서 핑거접합부가 분리되는 문제점이 나타났는데, 이는 길이 10.2 m의 층재를 생산하는 과정에서 접착층의 경화 이전에 가해진 충격에 기인할 것으로 예상되었다. 생산 현장에서 핑거접합부의 불량 발생 여부 확인과 그에 따른 대책 마련이 요구되었다.

4) 리기다소나무 심변재의 방부약제 주입 용이성 차이로 방부약제가 불균일하게 흡수되었으며, 이는 집성재 접착면의 접착성을 저하시켜 최종적으로 휨강도가 기준에 미달하는 문제점이 확인되었다. 따라서, 리기다소나무 집성재의 내구성을 높이기 위해서는 집성재 제조 후에 유용성 방부제로 처리하는 등의 방법에 대한 추가적인 검토가 요구되었다.

참 고 문 헌

1. 한국표준협회. 2005. 구조용집성재. KS F 3021.
2. 국립산림과학원. 2006. 방부방충처리 목재의 침윤도 및 흡수량 측정 방법. 국립산림과학원 고시 2006-04호.
3. 국립산림과학원. 2009. 목재의 방부·방충처리 기준. 국

- 립산림과학원 고시 2009-07호.
4. 김광모, 심국보, 박주생, 김운섭, 임진아, 여환명. 2007. 리기다소나무의 구조용 집성재 이용기술 개발 - 낙엽송 층재와의 혼합 구성을 통한 집성재의 휨성능 향상. 목재공학 35(6): 13~22.
 5. American Institute of Timber Construction. 2007. Standard for Preservative Treatment of Structural Glued Laminated Timber. AITC 109-2007. 11p.
 6. American Plywood Association Engineered Wood Systems. 2006. Preservative Treatment of Glued Laminated Timber. APA EWS Technical Note Number S580C. 12p.
 7. Kang, S. M., G. N. Kim, K. M. Kim, W. M. Koo, D. J. Jung, and K. M. Kim. 2011. Effect of copper contents on bonding strength of preservative treated glulam. 2011 Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting: 174-175.
 8. Lee, S. J., C. D. Eom, and K. M. Kim. 2011. Structural Performance of Finger - Jointed Lumber with Different Joint Configurations. Journal of the Korean Wood Science and Technology 39(2): 172-178.