

제조환경이 폴리우레탄 접착제를 이용한 혼합 CLT의 박리에 미치는 영향

Influence of Manufacturing Environment on Delamination of Mixed Cross Laminated Timber Using Polyurethane Adhesive

Dabin SONG¹ · Keonho-KIM^{1,†}

¹Wood Engineering Division, Department of Forest Products and Industry, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

초록 : 폴리우레탄(PUR) 접착제를 사용한 혼합 직교 집성판(CLT)의 접착 성능에 대한 제조환경의 영향을 조사하기 위하여 온도 및 상대습도에 따른 삶은바리 시험을 진행하였다. 5-ply 혼합 CLT는 외층과 중층에는 낙엽송을 사용하였고 나머지 내층에는 백합나무를 사용하였다. 오픈시간이 10분과 30분으로 다른 PUR 접착제를 사용하였다. 혼합 CLT는 PUR의 압체시간과 여름과 겨울의 제조환경에 따라 제조되었다. 여름철 환경의 경우, 오픈시간이 10분인 PUR 접착제를 사용하여 압체시간을 4시간 가하여 제조한 혼합 CLT의 박리율이 KS F 2081의 기준을 만족하였다. 겨울철 환경의 경우 혼합 CLT의 박리율이 KS 기준을 만족하지 못하였다. 다만, 제조 조건에서 접착제의 오픈 시간에 따라 가압시간을 조절함으로써 접착제의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 간접 수분 공급 방법으로 제조된 오픈시간 30분인 PUR 접착제를 사용한 CLT의 박리율은 직접 수분공급 방법보다 11.2% 우수하였다. 상대습도 및 접착제의 동일한 조건에서 박리시험을 실시한 결과, 제조환경의 온도가 접착제 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

1. 서론

최근 산업 발달로 인하여 온실가스 배출량이 증가함에 따라 기후온난화가 가속화되면서 21세기 건축은 구조적 안정성뿐만 아니라, 에너지 성능과 친환경성을 모두 충족시키는 방향으로 전환되었으며, 건축과정에서 생성되는 탄소발생량을 감소시키기 위해 다양한 건축구조분야의 전 과정에서 탄소감축 방안을 제시하고 있다. 산림청은 숲의 탄소흡수기능과 목재의 탄소저장기능을 탄소중립 추진방안으로 수행하고 있으며, 이러한 탄소중립 방안은 이미 국제적으로도 인정되고 있다. 따라서 탄소 저장소이자 재생가능한 친환경 건축의 주요 소재인 목재에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 공학목재는 목재의 이방성 재료의 특성 발생을 최소화시켜 치수안정성을 높이고, 설계가 가능한 건축부재로 중고층 목조건축의 주요 구조부재로 사용되고 있다. 1970년대와 1980년대 오스트리아에서 구조용 직교 집성판(cross-laminated timber, 이하 CLT)이라는 목질 건축재료가 처음 개발되었다(Li *et al.*, 2019). CLT는 등급구분된 층재를 직교적층한 구조용 면재료로서 치수 안정성이 높고 공기투과성이 낮으며, 상대습도 및 열에너지에 대한 고유한 특정 저장용량을 제공한다(Brandner *et al.*, 2016). 현재 북미, 유럽, 일본 등 목재산업 선진국에서는 CLT를 이용한 고층 건축물 설계가 증가하고 있으며, CLT의 상용화를 위해 내화성능, 차음성능, 열적 특성, 구조성능에 대해 학계와 산업에서 많은 연구가 진행되고 있다. CLT의 더 나은 성능을 확보하기 위해 CLT의 구성 조건을 다른 수종 간 결합이나 합판, 대나무, FRP 등과 결합한 하이브리드 CLT를 제조하는 연구도 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2021; Galih *et al.*, 2020; Jang *et al.*, 2019; Jung *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021).

활엽수의 CLT 이용 가능성은 Kramer *et al.*(2014)에서 비중 0.34의 하이브리드 포플러를 활용한 CLT가 미국표준인 ANSI/APA PRG 320에서 제시한 E3 등급과 동등한 휨 성능을 보여주며 구조용재료의 이용가능성을 제시하였고, Mohamadzadeh *et al.*(2015)은 백합나무 CLT의 강도적 성능이 ANSI/APA PRG 320에서 등급 V1, V2 기준보다 휨 강도와 휨 강성 부분에서 뛰어난 강도 성능을 보인 것을 확인할 수 있었다고 보고하였다. 휨 허용응력이 소나무 설계치보다 높게

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.
Journal of The Korean Wood Science and Technology 50(3): 167-178. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.3.167>

나타남으로 인하여 백합나무가 구조용재로 이용이 가능할 것으로 판단된다(Lim *et al.*, 2010). 그러므로 활엽수인 백합나무의 CLT 층재로서의 이용가능성은 충분할 것으로 보인다. 강도 성능뿐만 아니라, 내구성능에 대한 품질도 고려하여야 한다. 내구성능시험 중 품질표준에서 제시하는 접착성능은 다양한 인자로 인하여 영향을 받으며, 심지어 강도성능에서 영향을 미치기 때문에 최적의 제조조건 연구가 필요하다. Yusof *et al.*(2019)의 연구에 따르면 Acacia 수종의 PRF와 PUR로 제작한 시험편 중 더 낮은 박리율이었던 PRF로 만든 시험편의 휨, 전단, 압축 등에서 더 우수한 강도 성능을 보인 것을 알 수 있었다. Knorz *et al.*(2017)은 층재의 압제 압력과 층재 두께는 박리결과에 영향을 미치지 않는다고 보고하였으며, Han *et al.*(2019)은 CLT를 제작할 때 높은 함수율의 층재 사용이 박리결함을 발생시키기 때문에 함수율 15% 미만인 층재의 사용을 제안하였다. Song and Hong(2016)은 층재 연륜 방향이 CLT의 접착성능에 영향을 준다고 보고하였다. 북미나 유럽에서는 주로 친환경적이며 경화시간이 짧은 접착제인 폴리우레탄 접착제를 사용하고 있고, 폴리우레탄 접착제는 접착성, 유연성, 저온에서의 접착성능, 높은 응집강도, 쉽게 조절되는 경화속도의 특징을 가지고 있다(Kim *et al.*, 2003). Gong *et al.*(2016)은 낙엽송 CLT의 최적의 접착조건으로 폴리우레탄 접착제를 압제압력 1.2 MPa, 도포량 200 g/m²로 적용하는 것이 경제적이라고 보고하였다. 하지만 과도한 온도나 상대습도가 폴리우레탄 접착제의 접착강도를 저하시킨다고 보고하였다(Na *et al.*, 2018; Kunniger *et al.*, 2019). 따라서 Fig. 1과 같이 국내 기후조건이 계절에 따라 온·습도 차이가 발생할 경우, CLT의 제조환경에 따라 폴리우레탄 접착제가 CLT의 접착성능에 영향을 줄 것으로 사료된다.

본 연구에서는 숙경화성 접착제인 폴리우레탄 접착제를 이용한 낙엽송과 백합나무의 혼합 CLT의 제조조건 확립을 위해 국내 제조환경이 접착성능에 영향을 미치는 인자들을 탐색하기 위한 접착성능시험을 실시하였다. 국내의 계절 변화에 따라 달라지는 온·습도조건과 CLT 제조 시 압제조건에 따른 CLT의 폴리우레탄 접착성능을 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. CLT제조용 층재

혼합 CLT를 제작하기 위해 층재의 수종은 낙엽송(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière)과 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)를 사용하였다. 낙엽송과 백합나무의 층재 크기는 폭 100 mm, 두께 25 mm, 길이 500 mm 층재를 사용하였다. 층재는 육안으로 17 mm 이하의 웅이나 갈라짐이 없는 무결점 층재로 선별하였다. 층재는 경기도 여주 중부유통센터에서 구입하였으며, 평균 기건밀도와 평균 기건함수율은 낙엽송의 경우 각각 0.54 g/cm³, 10.5%, 백합나무의 경우 각각 0.59 g/cm³, 12.2%였다. CLT 제조용 접착제는 상용화되고 있는 G10(A) 1액형 폴리우레탄 접착제(K사, 핀란드)를 사용하였다. 일반적으로 K사의 폴리우레탄 접착제는 온도 18-20℃와 상대습도 40-75% 사이 환경에서의 사용을 권장한다. CLT 제조공정의 자동화 정도에 따라 접착제의 가사시간이 확보되어야 하기 때문에 국내 제조공정을 반영하여 가사시간을 늘린 G10 접착제(G10B)를 추가로 선정하여 적용하였다(Table 1).

2.2. 혼합 CLT 제조 및 실험방법

2.2.1. 혼합 CLT 제조 방법

혼합 CLT의 구성으로 외층재(external layer)와 중층재(middle layer)는 낙엽송을 사용하였고, 내층재(internal layer)는 백합나무를 사용하였다(Fig. 2). 폴리우레탄 접착제의 도포량은 일면도포 200 g/m², 압제압력은 유압프레스를 사용하여 1 MPa로 적용하였다(A사, 한국). 혼합 CLT는 접착제의 종류, 압제시간, 온도 및 상대습도, 수분의 공급방식에 따라 제조하였다(Fig. 3).

CLT 시험편은 여름과 겨울에 실험실 조건으로 접착제의 TDS(technical data sheet)를 참고하여 압제시간 4시간을 적용하여 각각 제작하였다. 그리고 Tankut *et al.*(2016)이 압제시간이 접착제의 유형뿐만 아니라, 주변환경의 온도와 습도의 영향을 받는다고 보고하였다. 그러므로 실험실의 내부 온습도는 여름에는 평균기온 24.2℃, 상대습도 64.1%였고, 겨울은 평균기온 15.3℃, 상대습도 20.8%인 상태에서 진행되었다. 압제시간에 따른 접착성능을 비교하기 위하여 권장 압제시간(LY4)을 기반으로 압제시간 1시간(LY1)과 6시간(LY6)을 적용하여 CLT 시험편을 제작하였다. LY1타입은 여름철 고온다습한 제조환경과 생산성을 고려하였으며, LY6타입은 겨울철 저온건조한 제조환경과 레조르시놀 접착제보다 숙경화성인 접착특성을 고려하여 선정하였다. 또한 가사시간을 증가시킨 G10B접착제를 사용하여 압제시간을 4시간(LYB4)과 6시간(LYB6)을 적용하여 혼합 CLT를 제조하였다.

겨울기간 내 건조한 제조환경을 개선하기 위해 수분공급 방법에 따른 혼합 CLT를 제조하였다. Galvez *et al.*(2020)에서

는 접착제 성분의 혼합만으로는 기계적 특성의 최대값에 도달하지 못하고, 적절한 상대습도와 온도에 노출되어야 한다고 보고하였다. 그리고 습도는 경화가 이루어지기 위해서 필요하고 온도가 증가하면 고분자의 교차결합을 증가시키지만, 오히려 긴 노출시간은 고분자의 분해를 야기한다라고 하였다. 그러므로 폴리우레탄 접착제는 수분에 의해 영향을 받는 접착메커니즘을 가지고 있다. 접착제 도포 전 층재 표면에 직접적으로 수분을 공급하는 방법과 CLT 제조공간에 간접적으로 수분을 공급해주는 방법으로 구분하여 혼합 CLT를 제조하였다. 직접적으로 수분을 공급해 주었을 때 층재의 표면 함수율은 2.5% 증가하였다. 간접적 수분공급 방법은 상대습도 60%를 목표로 가습하였다. Table 2는 CLT 접착조건과 명명법에 대한 Table이다.

5 ply 혼합 CLT 크기는 500(b) × 500(l) × 125(h) mm로 제작하였으며, 제작 후 일주일 간 실온에 양생하였다.

2.3. 삶음박리 시험 방법

양생한 CLT를 100(b) × 100(h) × 125(l) mm의 크기로 다시 제재하여 24개의 삶음박리 시험편으로 사용하였다. 혼합 CLT의 접착성능시험은 KS F 2081 구조용 직교 집성판(2021)에 의거하여 삶음박리 시험을 수행하였다. 삶음박리 시험은 시험편을 끓는 물에 4시간 동안 침지시키고, 다시 상온(10-25℃)의 물속에 1시간 침지시킨 후 70±3℃의 항온 건조기 안에 넣어 질량이 시험 전 질량의 100-110%의 범위가 되도록 건조한 후에 박리율을 측정하였다. 박리는 3 mm 이상인 박리길이를 측정하고, 건조나 용이 등에 의한 목재의 갈라짐은 측정에서 제외하였다. 모든 시험편의 박리율은 4측면의 접착층을 기준으로 측정하였으며, equation (1)을 사용하여 박리율을 산출하였다.

$$\text{Average boiling water delamination}(\%) = \frac{L_D}{L_G} \times 100 \quad (1)$$

여기서 L_D 는 시험편의 횡단면에서 평행 접착층, 표면과 뒷면을 제외한 4측면의 직교 접착층에서 박리길이의 합, L_G 는 시험편의 횡단면에서 평행 접착층, 표면과 뒷면을 제외한 4측면의 직교 접착층의 모든 접착층길이의 합이다.

CLT의 접착성능 기준은 KS F 2081에 의거하여 삶은 박리율 10% 이하로 규정하고 있다. 삶음박리시험 결과에 따라 성능개선을 위한 제조조건을 선택하였다. 제조환경에 따른 혼합 CLT의 접착성능 분포를 알아보기 위해 Fig. 4와 같이 부위별 평균 박리율을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제조 환경 조건 혼합 CLT 삶음박리 시험 결과

3.1.1. 계절에 따른 압제시간별 CLT 박리율 비교

제조환경에 따른 폴리우레탄 접착제의 CLT 접착성능을 알아보기 위해 압제시간별로 시험편을 제작하여 비교하였다. 여름에 압제 시간 4시간을 적용하여 제작된 시험편 LY-A4SN의 평균 박리율은 5.3%로 KS 품질기준에 만족하였다. CLT의 생산성 향상을 위해 압제 시간을 1시간으로 단축하여 제작한 LY-A1SN 시험편은 평균 박리율 14.1%로 KS 품질기준에 만족하지 못하였다. 겨울에 제작하여 압제시간 4시간을 적용한 LY-A4WN은 평균 박리율이 25.8%로 KS기준을 만족하지 못하는 박리율을 보였다. 압제시간을 증가시켰을 경우, LY-A6WN은 LY-A4WN보다 2.3% 낮은 평균 박리율을 보였다. Fig. 6의 계절에 따른 부위별 박리율을 비교해 보면 여름에 제작한 시험편인 LY-A4SN이 전반적으로 모든 부위에서 양호한 접착성능을 보였으며, 겨울의 기후조건인 LY-A4WN 시험편은 특정부위에서 높은 박리율을 보였던 것을 알 수 있었다(Fig. 6). 그러므로 추후 국산 혼합 CLT 제조를 위해 폴리우레탄 접착제를 적용할 경우, 주변 온도나 습도에 따라서 적절한 압제 시간을 구명해야 할 것으로 보인다.

3.1.2. 접착제의 가사시간에 따른 박리율 비교

겨울에 제작된 혼합 CLT의 접착성능을 개선하기 위해 가사시간을 증가시킨 G10B 접착제를 사용하여 최적 압제시간을 탐색하였다. 가사시간이 증가한 G10B 접착제를 사용한 LY-B4WN의 시험편이 평균 박리율 22.9%로 KS 기준에 만족하지 못하였다. 그러나 압제 시간을 증가시켰을 경우, LY-B6WN의 시험편은 7.9% 개선되는 효과를 확인할 수 있었다. 가사시간이 짧은 접착제(G10A)를 사용한 LY-A4WN과 LY-A6WN의 박리율을 비교하여도 압제시간을 증가시킨 시험편이 더 나은 접착성능을 보였다. 그리고 동일한 조건으로 가사시간만 다른 접착제의 시험편을 비교하였을 경우, 가사시간이 긴 G10B로

제작한 시험편의 접착성능이 더 나은 것을 확인할 수 있었다. Tankut *et al.*(2016)에서 많은 접착 불량에 가사시간을 초과하여 발생한다고 보고하였다. 그러므로 폴리우레탄 접착제를 사용하여 혼합 CLT를 제작할 때 적절한 가사시간을 고려한 사용이 필요한 것으로 보인다.

3.1.3. 온습도 조건이 박리율에 미치는 영향

겨울에 직·간접적인 수분공급에 따른 함수율 변화에 따라 폴리우레탄 접착제를 사용한 혼합 CLT의 접착성능을 검증하였다. 직접적으로 층재에 수분을 공급하여 제작한 혼합 CLT LY-A4WD와 LY-B4WD는 KS 품질기준에 만족하지 못했다. Sterley *et al.*(2012)에 의하면 폴리우레탄 접착제는 함수율이 높을수록 경화속도가 빨라지는 것으로 보고하였다. 간접적으로 수분을 공급하여 제작하였던 LY-A4WI와 LY-B4WI는 직접적으로 수분을 공급하여 제작한 시험편보다 평균 박리율이 각각 14.1%, 11.2%의 차이를 보이며 더 나은 접착성능을 보였다. Fig. 7의 부위별 박리율을 비교해 보면 직접적으로 수분을 공급하여 제작하였던 LY-B4WD의 시험편이 접착제 자체의 빠른 경화로 인해 목재와 접착제간 접착라인이 형성되지 못하여서 가장 높은 박리율을 보이는 것으로 사료된다. LY-B4WN과 LY-B4WD보다는 LY-B4WI의 시험편이 더 나은 접착성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 동일한 조건으로 가사시간이 다른 접착제의 시험편끼리 비교하였을 경우, 가사시간이 증가한 시험편들이 더 나은 접착성능을 보인 것을 확인할 수 있었다.

폴리우레탄 접착제의 온도의 영향을 알아보기 위하여 상대습도 60%로 비슷한 습도를 가진 두 시험편 LY-A4SN과 LY-A4WI를 비교하였다. 평균박리율이 21.1% 차이를 보이는 것으로 보였으며, Fig. 8을 보면 부위별 박리율에서도 확연한 차이를 관찰할 수 있었다. 그러므로 온도도 폴리우레탄에 영향을 미치는 요소인 것을 알 수 있었다. 그러므로 폴리우레탄 접착제를 사용하여 혼합 CLT를 제작하기 위해서는 계절에 따른 온습도 변화에 최적의 접착환경을 유지하는 조치가 필요할 것으로 보인다.

3.2. 혼합 CLT의 박리 형상

혼합 CLT의 삶음박리시험 후 박리형상은 대표적으로 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 나타난다. Fig. 9와 같이 KS의 삶음박리 기준을 만족한 시험편은 접착제로 인해 건조에 의한 층재변형을 억제하므로 목재의 파단이 발생하였다. Fig. 10은 KS 품질 기준을 만족하지 못한 시험편으로서 건조에 의해 발생하는 cupping이나 crowning 현상의 목재를 접착제가 억제하지 못하고 접착층에서 박리가 발생하였다[Fig. 10(b)]. 본 실험에서 설정한 여름 조건의 시험편의 경우, 목재와 접착제 간의 접착력이 우수하여 접착층 박리보다는 목재 간 파단이 많이 관찰되고, 겨울조건으로 제작한 시험편의 경우 접착층 박리가 발생하였다.

4. 결론

국내 제조환경에서 폴리우레탄을 이용한 구조용 혼합 CLT의 최적 접착조건을 탐색하기 위하여 접착제의 가사시간과 그에 따른 압제시간, 제조환경의 온습도 조건과 수분공급방식에 따라 혼합 CLT를 제작하여 삶음박리시험을 수행하였다. 각 타입에 따른 삶음박리시험에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 여름의 제조조건(평균기온 24.2℃, 상대습도 64.1%)에서 가사시간이 짧은 폴리우레탄 접착제를 사용하고, 압제시간 4시간을 적용하여 제조한 혼합 CLT의 삶음박리율은 KS 접착성능 기준을 만족하였다.
- 2) 겨울의 제조조건(평균기온 15.3℃, 상대습도 20.8%)의 경우, 폴리우레탄을 사용하여 제작한 혼합 CLT의 삶음박리율은 KS기준을 만족하지 못하였다. 그러나 접착제의 가사시간과 압제시간을 증가시켰을 경우와 간접적인 수분공급으로 상대습도를 상승시킬 경우, 혼합 CLT의 접착성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 비슷한 상대 습도 조건에서 여름의 제조조건과 겨울 제조조건으로 제작한 혼합 CLT를 평균 박리율을 비교하였을 경우, 여름의 제조조건으로의 CLT가 더 우수한 접착성능을 보인 것으로 보아 온도 또한 접착성능에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

따라서 폴리우레탄을 이용한 구조용 CLT의 제조조건으로서 접착제 특성에 따른 제조시간과 최적의 온습도 조건을 탐색하는 데 본 연구가 기초자료로 사용될 것이라고 판단된다.