

낙엽송 직교집성판의 휨과 압축 강도 성능에 대한 층재 구성의 영향

Influence of Composition of Layer Layout on Bending and Compressive Strength Performance of Larix Cross-Laminated Timber (CLT)

Da-Bin SONG¹ · Keon-Ho KIM^{1,*}

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

초록 : 본 연구에서는 낙엽송 CLT의 층재 구성이 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 휨과 압축 강도를 수행하였다. 낙엽송 CLT은 5매로 적층하였으며, 층재의 등급과 구성에 따라서 총 4종류로 분류하였다. 낙엽송 CLT 층재 구성방법으로 1) 강축방향 층재와 약축방향 층재를 교차적층하는 방식(Type A)과 2) 강축방향 외층재와 약축방향 층재 등급을 적용한 내층재를 교차적층하는 방식(Type B)으로 구분하였다. 등급 E12와 E16은 KS F 3020에 따라 Type A의 강축 방향 층재와 Type B의 외층용 층재 등급으로 사용하였다. 동일한 등급의 층재를 사용한 CLT의 휨 시험결과 Type B의 휨탄성계수가 Type A보다 높게 나타났다. 낙엽송 CLT의 휨탄성계수를 예측한 경우에 실험 휨탄성계수가 Shear analogy법보다 1.00~1.09 배, Gamma 방법의 경우 1.14~1.25배보다 높게 측정되었다. 따라서 낙엽송 CLT의 휨탄성계수는 Shear analogy법으로 예측하는 것을 권장한다. 층재 구성에 따른 CLT의 압축강도는 E12와 E16 층재를 사용한 Type A가 동일한 등급 층재로 구성된 Type B보다 각각 2%, 9% 높게 측정되었다. Type A의 파괴형상에서는 압축하중에 의해 발생한 파괴의 진행방향이 강축방향의 중간 층재에 의한 롤링전단 또는 접착라인 파괴에 의해 강축방향에서 약축방향으로 전이되는 것을 확인하였다.

1. INTRODUCTION

기후변화 대응방안 중 하나인 친환경 건축부재 이용이 세계적으로 관심을 받고 있다. 탄소배출과 내재에너지가 큰 콘크리트와 철강보다는 탄소 방출량이 15~20% 적고 이산화탄소를 흡수하여 저장하는 목재가 건축재료로서 각광받고 있다 (Chang *et al.*, 2017). 최근 고층 목조건축물의 주구조재로 구조용 적층목질재료의 이용이 증가되고 있다. 구조용 직교 집성판(cross laminated timber, CLT)은 최소 3매 이상 층재를 교차로 적층하여 접착한 공학목재이다. 특히 탄소배출이 많은 건축재료 대신 CLT를 활용할 경우 에너지를 절약하고 탄소배출량을 줄일 수 있다(Liu *et al.*, 2016). CLT공법에 대한 연구가 활발히 진행 중인 캐나다에서는 고층건축물의 건설사례가 증가함으로 인해 CLT가 고층용 친환경 대체 건축부재로써 주목받고 있다(Choi *et al.*, 2021). CLT공법은 콘크리트-철근구조에 비해 건축비용과 시공시간을 줄일 수 있고 수직-수평 저항내력이 우수한 건축공법으로 잘 알려져 있다. Ceccotti *et al.*(2013)은 CLT공법을 적용한 목구조물의 우수한 내진성능을 보고하였으며, Muszynski *et al.*(2019)은 CLT로 제작된 바닥패널이 ASTM E119 표준절차에 따른 2시간 내화성능을 만족하였다고 보고하였다. Yoo and Lee(2019)는 국산목재의 효율적 이용을 위해 CLT 제작시 저급목재의 이용가능성을 탐색하였다. 중목구조의 경우 설계하중에 따라 보와 기둥, 전단벽을 구분하여 설계하나 CLT의 경우 벽, 바닥, 지붕 등으로 사용이 가능한 구조이기 때문에 구조부재의 용도별 작용하중에 대한 성능데이터가 필요하다. CLT의 강도특성에 영향을 미치는 인자는 수종, 등급구성, 층재 내 용이 비율과 층재의 두께비, 층재의 배열각도, 접착조건 등이 있다(Buck *et al.*, 2016; Gong *et al.*, 2019; He *et al.*, 2021; Kim, 2020; Pang and Jeong, 2019; Sikora *et al.*, 2016; Song and Hong, 2018; Song and Kim, 2022; Trisatya *et al.*, 2023). CLT의 강도 성능 향상을 위해 대나무를 층재로 사용하거나 콘크리트나 FRP 등을 사용한 하이브리드 CLT의 연구도 활발하게 진행 중이다(Galih *et al.*, 2020; Jiang and Crocetti, 2019; Jung *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2021). 또한 효율적인 목재이용방안으로 CLT의 층재를 제재목이 아닌 공학목질재료로 활용하여 강도성능을 평가한 연구사례도 있다(Choi *et al.*, 2018, 2020, 2021; Fujimoto *et al.*, 2021). 그리고 목조건축의 고층화, 대형화에 따라 접합

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.
Journal of The Korean Wood Science and Technology 51(4): 239-252. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.4.239>

방식이 중요해지고 이에 따라 사용되는 Screw류와 같은 철물에 의한 다양한 강도 평가도 이루어지고 있다(Ahn *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2021, 2022). 현재 CLT의 품질기준은 각국의 나라들마다 자국의 주요 수종과 특징에 따라 다르며 규격과 품질성능 평가를 위한 실험방법 또한 다르다. CLT 제조방법의 경우 북미(ANSI/APA PRG320)와 같이 강축-약축을 기준으로 CLT를 제작하는 방식과 일본(JAS 3079)처럼 외층-내층으로 층재를 구별하여 사용하는 방식으로 구분된다. 이러한 구성방식은 CLT를 설계할 때 예측값에 차이를 발생시킨다. CLT의 결점분포 등 다양한 조건에 따라 휨성능기준을 평가하는 시험방법도 나라마다 차이를 보인다.

따라서 본 연구는 층재등급과 구성조건이 낙엽송 CLT의 강도성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 휨과 압축시험을 수행하였다. 실험을 통한 CLT 층재 구성조건에 따른 휨강도 성능의 차이를 비교하고 휨성능 예측식을 통해 적용가능한지 검증하였다. 하중조건에서 CLT의 구성조합에 따라 파괴형상을 비교하였다.

2. MATERIALS and METHODS

2.1. 재료

사용한 공시재료는 경기도 여주 목재유통센터에서 낙엽송(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière) 140(B) × 30(H) × 3,600(L) mm 층재를 구입해서 사용하였다. 사용한 낙엽송 층재의 평균 기건 밀도는 569 kg/m³, 평균 함수율은 10.7%였다. CLT제작용 층재는 먼저 육안으로 품질검사를 통해 선별하였으며, 기계등급구분기(MGFE-251, JMW, 일본)를 이용하여 휨탄성계수를 측정 후 KS F 3020에 따라 등급을 분류하였다. 예를 들어 층재의 등급 E12는 12 GPa 이상 13 GPa 미만이어야 한다. 총 704본의 층재를 기계등급 구분하였다. 낙엽송 층재 기계등급구분 결과(Fig. 1), 가장 많은 분포를 보인 등급은 E12(16.5%)였으며, E11 이하는 전체의 28%를 차지하였다.

2.2. 휨 및 압축 시험을 위한 CLT 제조

2.2.1. 혼합 CLT 제조 방법

낙엽송을 사용한 CLT는 5 ply로 교차 적층하여 제작하였다. CLT의 등급구성 조합에 따라 1) 3매의 강축 방향 층재인 강축층재와 2매의 약축 방향 층재인 약축층재로 교차적층하여 조합한 강축-약축 방식(A type)으로 구성하였고 2) 2매의 외층재와 외층재를 제외한 모든 층을 의미하는 내층재를 3매를 사용하여 A type과 동일하게 교차 적층 조합한 외층-내층 방식(B type)으로 구성하였다. 층재 등급분포에 따라 강축층재와 외층재의 등급은 E12와 E16을 적용하였고 약축층재와 내층재로 E9와 E10을 사용하였다. Table 1을 참고하며 조합으로 2종류, 등급으로 2종류 총 4종류로 나누어 낙엽송 CLT를 제작하였다. 접착제는 PRF접착제(Phenol-Resorcinol-Formaldehyde)를 사용하였고 접착제의 물성은 Table 2에 제시하였다. 단면 도포량 200 g/m²로 압제 압력은 1 MPa로 24시간 압제하였고 온도 20℃ 상대습도 65%인 항온항습실에서 일주일 동안 항온 양생하였고 휨 시험을 진행할 때도 같은 온도, 상대습도에서 진행하였다.

2.3. 실험방법

2.3.1. 휨 실험

층재 등급과 구성조합에 따라 낙엽송 CLT의 휨 강도 성능을 비교하였다. 휨 시험편의 단면 크기는 폭 280(w) mm 두께(h) 150 mm였으며 시험편의 길이는 3,300 mm(22 h)로 제작하였다. CLT의 휨시험방법은 KS F 2081(구조용 직교 집성판)을 참고하였으며, 구성 조합당 4개씩 총 16개의 휨강도 시험편을 제작하였다. 지간거리는 21 h, 하중간거리는 7 h로 적용하였다. Nocetti *et al.*(2013)는 CLT의 휨탄성계수를 2가지 방법으로 측정하였다. 이 연구에서 Global MOE는 전체 길이 범위의 총 휨처짐량을 이용하여 산출하며 이는 휨과 전단에 따른 변형을 의미하고, Local MOE는 하중간거리의 휨처짐량을 이용함으로써 전단 없이 순수 휨변형을 나타낸다고 보고하였다. 본 연구는 EN16351를 참고하여 Fig. 2와 같이 CLT 시험편 앞면에 하중거리(6 h)와 뒷면에 지간거리(21 h)에 Yoke를 각각 달아 지간거리간 변형률과 하중거리간 변형률을 측정하여 Global MOE(MOE_G)와 Local MOE(MOE_L)를 각각 구해 비교하였다. 시험편은 만능강도 시험기(MTS cn/e45, 최대용량 300 kN)를 사용하여 12 mm/min의 하중속도로 4점 하중 시험을 진행하였다. 그리고 식 (1)을 이용하여 MOR(Modulus of Rupture)를 산출하였고 식 (2)와 (3)을 이용하여 MOE_G(Modulus of Elasticity)와 MOE_L를 산출하였다.

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

$$MOE_G = \frac{Pa}{4bh^3 \Delta_{Global}} (3l^2 - 4a^2) \quad (2)$$

$$MOE_L = \frac{3al_1^2 P}{4bh^3 \Delta_{Local}} \quad (3)$$

MOR은 휨파괴강도(MPa)를 나타내며 MOE_G , MOE_L 은 각각 Global과 Local 휨탄성계수(GPa)를 나타낸다. P_{max} 은 최대하중(kN)을 의미하며 a 는 하중거리와 지점사이의 거리를 나타내며 b 는 CLT 폭을, h 는 CLT 두께를 의미한다. l 은 시험편의 길이 즉 지간거리를 나타내며 l_1 은 gauge length for the determination of modulus of elasticity를 나타낸다. Δ_{Global} 와 Δ_{Local} 은 Global과 Local 구간의 각각의 비례한도 변형을 나타낸다.

2.3.2. 압축 실험

압축강도 시험편의 크기는 폭 280 mm, 두께 150 mm이며 수평방향으로 좌굴이 발생하여 파괴가 되는 것을 방지하기 위해 좌굴이 발생하지 않는 세장비 30 이하의 단주로 시험편을 제작하였다(ASTM D198). 압축강도 시험편 길이는 세장비 6.9인 270 mm로 제작하였다. 구성 조합당 12개씩 총 48개의 압축강도 시험편을 제작하였고 압축강도 시험기를 사용하여 2 mm/min의 속도로 압축강도 실험을 진행하였다. EN 408을 참고하여 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 압축강도와 압축탄성계수를 산출하였다. 압축탄성계수는 시험편 전체의 변형량을 통해 산출하였다.

$$f_{c,0} = \frac{P_{max}}{A} \quad (4)$$

$$E_{C,0} = \frac{l_c(\Delta P)}{A(\Delta \omega)} \quad (5)$$

A 는 단면적(mm²)을 나타내며 l_c 은 탄성계수를 결정하는 게이지의 길이를 의미한다. ΔP 은 하중변형 곡선에서 직선부분에 대한 하중차이(N)를 나타낸다. Fig. 3 그래프에서 ($P_2 - P_1$)를 나타낸다. $\Delta \omega$ 은 그래프에서 ($\omega_2 - \omega_1$)를 의미하며 $P_2 - P_1$ 에 상응하는 변형량의 차이(mm)를 의미한다.

2.3.3. 휨 성능 예측

CLT Handbook에서 제안된 예측식으로 층재의 휨 특성을 이용하여 CLT의 휨 특성을 예측하여 비교 분석하였다. 휨 모멘트를 이용하여 휨 강도를 예측하였고 휨 강성을 이용하여 휨 탄성계수를 예측하였다. 휨탄성계수는 강축방향과 약축방향의 전단변형도 포함하는 방법인 Shear Analogy Method 예측 식 (8)과 유효강성 개념을 도입하여 약축방향의 전단변형을 포함하지만 강축방향의 전단변형을 포함하지 않고 약축방향의 전단 변형을 설명하기 위해 Connection Efficiency Factor 인 식 (10)을 이용하여 Gamma Method 예측 식 (9)를 사용하였다. 휨 강성에서 이차모멘트의 값을 나눠서 휨 탄성계수를 산출하였다.

$$(f_b S)_{eff} = f_b \times \frac{2 \times EI_{eff}}{E_1 h} \quad (6)$$

$$F_{b,CLT} = \frac{6 \times (f_b S)_{eff}}{bh^2} \quad (7)$$

$$(EI)_{eff,S} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_y \cdot \frac{t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_y \cdot z_i^2 \quad (8)$$

$$(EI)_{eff, Ga} = \sum_{i=1}^n E_{yi} \cdot I_{yi} + \gamma_i \cdot E_{yi} \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (9)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot h_i}{l^2 \cdot G_R \cdot b}} \quad (10)$$

$(I_b S)_{eff}$ 는 CLT 유효 휨 모멘트($N \cdot mm$)를 나타내며 $F_{b, CLT}$ 은 CLT 휨 허용응력(MPa)을 의미한다. $(EI)_{eff, S}$ 와 $(EI)_{eff, G}$ 은 각각 Shear Analogy와 Gamma법의 CLT 유효 휨강성($N \cdot mm^2$)을 나타낸다. E_{CLT} 은 CLT 휨 탄성계수(MPa), E_i 은 i 번째 층재의 탄성계수(MPa)를 의미한다. b_y 은 강축방향의 층재의 폭, A_i 은 i 번째 층재의 면적, CLT 층재의 개수를 나타내며 h_i 는 i 번째 층재의 두께(mm), I_{yi} 는 단면 2차모멘트(mm^4)를 의미한다. A_i 은 CLT 단면적(mm^2), z_i 는 i 번째 층재와 CLT 중심축 간의 거리(mm), G_R 는 롤링전단계수를 나타낸다.

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1. 낙엽송 CLT 휨 강도 성능 평가

3.1.1. 층재의 조합 구성에 따른 CLT 휨성능 비교

강축-약축(A type), 외층-내층(B type)으로 구성된 낙엽송 CLT의 강도 성능평가를 통해 휨 성능을 비교하였다. Table 3을 보면 LE12A가 LE12B보다 휨강도는 15% 증가한 강도 성능을 보였으나, MOE_G 와 MOE_L 는 감소하는 경향을 보였다. LE16A의 휨강도는 LE16B보다 7% 감소한 강도 값을 보였으며, MOE_G 와 MOE_L 는 각각 6%, 5% 감소하였다. LE16시험편의 휨강도는 파괴형상에서 알 수 있듯이 등급이 높은 층재를 사용하였을 경우 인장부에서 휨 파괴가 일어나기 전에 롤링전단파괴로 인해 측정되었다. 구성방식에서는 B type의 구성방식이 A type보다 높은 탄성계수를 보였다. 휨 탄성계수는 층재의 등급에 따라서 높은 등급의 층재를 사용한 CLT의 강도 성능이 더 우수한 것을 확인하였다. 그리고 Ravenshorst and van de Kuilen(2009)와 Nocetti *et al.*(2013)의 연구결과와 마찬가지로 MOE_L 의 평균값이 MOE_G 평균값보다 대체로 높게 나타나는 경향을 보였다.

3.1.2. 구성 조합에 따른 낙엽송 CLT 휨 강도 실험 파괴형상

Fig. 4는 낙엽송 CLT의 4점 휨시험 후의 파괴 형상을 보여주며 파괴형상으로는 Tensile failure mode와 Shear failure mode로 2가지 형상이 관찰되었다. CLT의 층재 조합 구성 과는 상관없이 층재 등급에 따라서 다른 파괴 형상을 보였다. 첫번째 파괴형상은 휨파괴 이후 전단파괴가 진행되는 형상으로 층재 등급 E12로 구성된 LE12A와 LE12B에서 주로 발생하였다. Fig. 4(a)와 같이 시험편에서 휨 응력에 의한 인장부에서 파괴나 웅이 등에 의해 휨 파괴가 대표적으로 보였다. 최외층이 휨 응력의 영향을 가장 많이 받기 때문에 일반적으로 상판의 웅이 보다는 하판의 웅이가 직접적인 파괴의 원인으로 보였다. LE12A의 파괴모드는 최외층재의 인장파괴가 일어났으나 중간층의 강축층재로 파괴가 전이되지 않고 접착층에 따라 전단 파괴 형상을 보인 것을 알 수 있다. 또 최대하중 측정이후 잔존강도 50% 이상을 유지하다가 이후에 최종적으로 파괴된 것을 볼 수 있다. 이는 중간층에 강축층재를 사용한 경우 인장부분층이 파괴된 후 중간층에서 파괴를 억제하는 경향을 보였다(Fig. 5). 두번째 파괴형상은 Fig. 4(b)와 같이 전단파괴로서 높은 등급의 층재를 사용한 E16 휨 시험편 대부분에서 관찰할 수 있었다. 이는 층재 배열에 따라 등급의 차이로 인해 휨파괴이전에 약축층재의 롤링파괴가 시작되어 발생한 것으로 생각된다. Pangh *et al.*(2019)와 Ettelaei *et al.*(2022)은 시간거리 18 h에서 E13 이상의 높은 등급의 층재를 사용한 CLT의 휨실험을 진행한 결과 대부분 롤링전단파괴를 관찰하였다고 보고하였다. Pang(2019)은 시간과 두께의 비에 따라 CLT의 파괴형상이 차이를 보였음을 확인하였다. 또한 Hematabadi *et al.*(2021)은 시간과 두께의 비가 증가할수록 최대모멘트는 증가하고 최대전단력은 감소하기 때문이라고 보고하였다. 이로 미루어 볼 때 E16 이상의 층재를 이용할 경우 CLT의 휨실험은 시간과 두께의 비를 고려한 시간거리를 설정할 필요가 있다.

3.1.3. CLT 구성 조합에 따른 휨성능 예측

A type, B type으로 구성된 낙엽송 CLT의 휨 강도와 CLT Handbook에서 제안한 예측식 2가지 방법으로 휨 탄성계수를 예측한 값과 실험값을 비교하였다. E12 등급의 층재를 사용한 CLT의 경우 식 (7)로 산출된 휨강도 예측값을 기준으로

식 (1)로 계산된 실험값의 휨강도비(Experiment/Prediction)는 1.07~1.22였다. E16 등급의 층재를 사용한 CLT의 경우 휨강도비를 비교해보면 0.90~0.98로 예측값보다 다소 낮은 강도값을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

휨 탄성계수는 Shear analogy법은 휨탄성계수비 1.00~1.09로 나타났고 Gamma법은 휨탄성계수비 1.14~1.25로 나타났다. 결과적으로 약축 방향의 전단 변형만 고려하는 Gamma법보다는 약축, 강축 방향의 전단 변형도 같이 고려하는 Shear analogy 방법이 더 유사한 값을 보였다. Crovella(2019)는 침엽수종은 예측치가 실험치보다 5%의 차이를 보였고 Banot(2018)에서도 강축의 수직전단변형과 약축의 롤링전단변형이 고려되는 Shear analogy법이 더 정확하다고 보고했다.

3.2. 낙엽송 CLT 압축 성능 결과

3.2.1. 층재의 조합 구성에 따른 낙엽송 CLT 압축 성능 결과

A type, B type으로 구성된 낙엽송 CLT의 강도 성능평가를 통해 등급의 구성 조합에 따른 압축 성능을 비교하였다. 압축 강도 시험편은 종류별로 평균값으로 비교하였다. 5 ply를 기준으로 A type 낙엽송 CLT가 B type 압축강도보다 E12와 E16에서 각각 2%, 9% 증가한 강도 성능을 보였으며 압축탄성계수는 각각 4% 증가한 차이의 강도성능을 보였다(Table 4). CLT의 종방향 압축강도는 하중을 받는 단면적이 중요하다. 목재의 경우 KS F 3020 침엽수구조용재 - 부속서A 침엽수 기계 등급 장기하중용력에서 섬유 직각방향보다 섬유방향인 압축시험편이 대략 3.4~4.3배 강한 압축 하중을 지지한다. CLT의 경우 제조방식에 따라 섬유방향이 교차로 적층되므로 강축층재의 비율에 차이가 발생한다. 그러므로 CLT의 압축강도성능은 층재의 등급보다 층재구성에 영향을 받는 것으로 사료된다.

3.2.2. 층재 조합 구성에 따른 낙엽송 CLT 압축 강도 파괴 형상

압축강도는 외층재 표면의 파괴형상과 옆면의 파괴형상으로 구분을 하였다. Table 4를 보면 시험편 종류마다 표면의 파괴형상비율과 옆면 파괴형상비율을 나타냈다. 외층재 표면의 파괴형상은 New Wood Physics and Mechanics(2008)를 참고하였으며 Fig. 6을 보면 전체적으로 압축 파괴 형상인 전단형(31.3%), 할렬형(6.3%), 압축형(31.3%), 설할형(25.0%), 압축 할렬(6.3%) 등 2개 이상의 복합적인 파괴형상이 많이 관찰되었다. 외층재 또는 웅이에서 할렬이 일어나 파괴가 시작되었으면 같은 시험편이라도 앞뒤 층재마다 다른 파괴형상을 보이기도 하였다. 그래서 제일 먼저 파괴된 부분에서의 파괴형상으로 선정하였다. 옆면의 파괴형상으로는 Tian *et al.*(2022)의 논문을 참고하였으며 옆면의 처음 파괴된 부분을 기준으로 파괴형상을 선정하였다. Fig. 7처럼 F는 층재의 찢어짐, G는 웅이파괴, H는 전단파괴를 기준으로 외층재나 강축에서 발생하는 파괴형상과 I의 연륜에서의 파괴, J의 접착라인 파괴를 기준으로 약축층재나 접착라인에서의 파괴된 형상이 나누어 구분하였다. 층재 조합 구성 방식은 A type 방식이, 등급은 높은 층재 등급인 E16 등급이 압축하중에 대한 내하력이 있어 파괴를 지연하여 외층재나 강축에서 발생하는 파괴 대신에 접착라인이나 연륜에서 먼저 파괴가 진행된 비율이 높은 것을 확인하였다. 이는 중간층의 강축층재가 파괴를 억제하는것으로 사료된다. 그리고 최종 파괴는 외층재 옆면에서 찢어짐이나 웅이, 전단 파괴 등과 내층재에서 연륜이나 접착라인에 따라서 파괴되는 형상 등이 같이 복합적으로 관찰되었다.

3.3. 구성 조합에 따른 CLT 층재 비율 비교

Fig. 8을 통해 CLT는 매수가 증가할수록 단면적 대비 강축이나 외층 면적 비율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 A type과 비교하여 B type의 층재의 구성 비율이 3 ply는 같지만 매수가 증가할수록 사용되는 층재의 비율이 다르게 나타난다. 낮은 등급의 층재 비율이 5 ply는 20% 차이를 보이고 7 ply와 9 ply 각각 29%와 33% 차이를 보인다. 층수가 늘어날수록 점점 큰 폭의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그러므로 층재의 효율적 사용을 위해서 CLT의 층재 구성 방식의 검토가 필요할 것으로 보인다.

A type, B type의 사용되는 층재 비율과 앞선 실험결과들의 강도적 차이를 고려하였을 경우 B type 층재 구성 방식이 층재의 효율적인 이용면에서 더 나은 방식으로 보인다.

4. CONCLUSIONS

본연구에서는 나라마다 다른 CLT 층재 구성 조건인 강축-약축과 외층-내층으로 2가지 등급 구성을 다르게 하여 만든 낙엽송 CLT의 휨과 압축 강도 성능뿐만 아니라 예측된 휨 강성과 실험값과의 관계를 알아보기 위해 낙엽송 CLT의 휨과 압축강도 실험을 진행하였다. 또 실험이 진행된 CLT의 파괴 형상을 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

1. CLT의 휨 성능 시험결과 휨탄성계수는 층재 구성보다 층재의 등급이 영향을 미치는 것을 확인하였다. 단, 중간층의

강축층재를 이용할 경우 최대 하중이후 파괴 진행을 지연시키는 역할을 하는 것으로 보인다.

2. 휨성능의 예측값과 실험값으로 보아 휨강도와 휨탄성계수 예측이 충분히 가능할것으로 보인다. 휨탄성계수에서 Gamma법보다는 실험값과 근접한 결과를 보인 Shear analogy법이 정확한 설계값 산출에 용이할 것으로 보인다. 그리고 층재의 등급에 맞는 사용을 위해서는 Shear analogy법으로 탄성계수를 예측하는 것이 더 나은 방법이다.
3. 압축성능의 결과에서 CLT의 중간층의 강축층재 등급 차이가 CLT 압축강도에는 영향을 미치는 것으로 보이며 이는 약축층재보다 많은 하중을 지지하는 강축층재 압축 강도 차이 때문인 것으로 사료된다. 그러므로 A type이 압축 성능에서 더 나은 구성 방식으로 보였다.
4. CLT의 압축파괴형상은 대표적으로 표면의 경우 전단형과 압축형, 측면의 경우 전단형이 관찰되었다. 중간층에 등급이 높은 층재로 배치한 경우 약축층재의 롤링파괴 또는 접착층파괴로 관찰되어 중간층재의 압축내하력이 지속되는 것을 알 수 있었다.