

CLT 바닥체의 제조방식에 따른 바닥충격음 차단 성능: 접합방식, 수종, 두께에 따른 영향

A Study on Floor Impact Sound Insulation Performance of CLT: Focused on Joint Types, Species and Thicknesses

Yeon-Su HA¹ · Hyo-Jin LEE¹ · Sang-Joon LEE^{1,†} · Jin-Ae SHIN¹ · Da-Bin SONG¹

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

초록 : 본 연구에서는 대한민국산 구조용 직교 집성판(CLT)의 접합방식, 수종, 두께에 따른 바닥충격음 차단 성능을 평가하였다. 현재까지 대한민국산 CLT 바닥체의 성능 평가가 이루어지지 않아, 본 연구를 통해 바닥충격음 차단 성능의 기초데이터를 정량화하였다. 실험에 사용된 CLT는 낙엽송과 소나무를 사용하여 5-ply, 150 mm로 제작하였다. 접합방식은 spline, butt, half-lap의 3가지 타입으로 구성하였다. 낙엽송 CLT의 두께는 150, 300, 450 mm로 변화시켰으며, 실험실 조건에서 바닥충격음 차단 성능을 측정하였다. 150 mm CLT의 중량충격음 차단 성능은 낙엽송 70 dB, 소나무 71.6 dB로 확인되었다. 경량충격음은 낙엽송 78.3 dB, 소나무 79.6 dB로 확인되었다. 실험 결과, 수종과 접합방식에 따라 유의미한 차이가 없는 것을 확인하였다. 두께에 대한 영향은 30 mm 증가당 중량충격음 1 dB, 경량충격음 1.6 dB이 감소되는 것으로 확인되었다. 본 연구는 CLT의 바닥충격음 차단 성능을 평가하는 기초연구로서 의미가 있을 것으로 사료된다.

1. 서론

대한민국 국내(이하 국내) 주택법에는 30호 이상의 공동주택에 대한 층간소음 기준이 명시되어 있다. 가볍고 딱딱한 충격에 의한 소음인 경량충격음과 무겁고 부드러운 충격에 의한 소음인 중량충격음 모두 49 dB을 넘지 않아야 한다. 콘크리트 210 mm 맨슬라브의 중량충격음 차단 성능이 53 dB($L_{iFmax,AW}$)로 조사되었던 연구를 고려하면(Kim *et al.*, 2004) 상당히 높은 성능을 요구하고 있다. 30호 이상의 공동주택을 목구조로 건축할 때도 이러한 성능 기준이 적용된다.

한편, 최근 탄소중립과 산림의 재순환을 목적으로 대한민국산 목재를 활용한 구조용 직교 집성판(CLT) 또는 다양한 목재를 목조 건축에 적용하기 위한 연구(Di Bella *et al.*, 2020; Hwang *et al.*, 2022; Oh, 2022; Oh *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2021)가 수행되고 있으며, CLT의 단일성능(Pang *et al.*, 2017a), 또는 여러 목재의 흡음률, 투과성능을 측정한 연구(Jang *et al.*, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d, 2022e; Kang *et al.*, 2019)가 수행된 바 있다. 그러나 국내 CLT 연구는 제작 및 역학 성능을 중심으로 수행되어 국산 CLT를 바닥재로 사용했을 때의 바닥충격음 차단 성능에 관한 연구는 미비한 상태이다(Jang *et al.*, 2019; Jung *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2022; Pang *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2022). 반면에, 국외에서는 CLT 슬라브의 차단 성능에 관한 연구가 일부 수행되었다. 180 mm 5-ply CLT를 이용한 연구에서 경량충격음 차단 성능이 86 dB로 확인되었고(Vardaxis *et al.*, 2022), 175 mm 5-ply CLT는 85 dB로 나타났으며, 245 mm 7-ply는 80 dB로 나타났다(Zeitler *et al.*, 2014). 그러나 그간의 연구가 경골목구조(Lee and Jang, 2023)와 중목구조를 중심으로 이루어진 만큼 국산 CLT를 이용한 바닥충격음 차단 성능 평가 연구가 요구된다.

바닥충격음 저감 공법에는 바닥슬라브를 충격으로부터 진동하기 어렵게 하는 ‘중량 · 고강성 바닥공법’, 충격에 의한 진동이나 충격에너지를 바닥슬라브에 전달되지 않도록 하는 ‘튼바닥 구조 공법’, 충격에 의해 바닥슬라브로부터 방사되는 소리를 차단하는 ‘이중 천장 공법’이 있다(Yang, 1998). 본 논문에서는 튼바닥 구조와 천장 구조 개발 이전에 CLT 슬라브 자체의 바닥충격음 차단 성능을 평가하기 위해 우선적으로 중량 · 고강성 바닥공법에 주목하였다. 본 연구에서는 CLT 슬라

브의 중량과 강성에 영향을 미치는 요인으로 CLT의 비중, 접합방식, 두께를 선정하였다. KS F 2081의 수종군 분류에 따르면 수종군 A는 전건비중 0.55 이상의 수종, 수종군 B는 전건비중 0.5~0.55 미만의 수종으로 분류하고 있다. 이에 따라 수종군 A와 B에서 주요 수종으로 사용되는 낙엽송과 소나무를 선정하여 수종의 비중에 의한 영향을 평가하였다. 또한, CLT의 대표적인 접합방식에는 spline, half-lap, butt 방식이 있으며, 접합방식에 따라 못이 박힌 방향과 간격, CLT 단면 형태에 차이가 존재한다. 이러한 결속 방식의 차이로 인해, 소리의 누음(leakage) 또는 충격원 가진 시 진동 거동이 상이할 가능성이 있다. 접합방식의 차이가 바닥충격을 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 3가지 접합방식별 비교를 수행하였다. 추가로, CLT의 두께를 변화시켜(150, 300, 450 mm) 실험하여 중량 변화에 따른 결과를 분석하였다. 이를 종합하여, 본 연구에서는 실험을 통해 국산 CLT 바닥체의 접합방식, 수종, 두께별 바닥충격을 차단 성능을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. CLT 제작방법

실험에 사용된 목재는 산림조합중앙회 중부목재유통본부에서 폭 130 mm, 두께 30 mm, 길이 3,600 mm의 대한민국 국내에서 자란 낙엽송(*Larix kaempferi*)과 소나무(*Pinus densiflora*)를 공수하여 사용하였다. 평균함수율 12% 이내로 건조된 낙엽송 1,716본, 소나무 1,016본을 CLT 제작에 활용하였으며, 등급구분은 중부목재유통본부에서 보유하고 있는 기계등급 구분기(MGFE-251, JMW, 일본)를 활용하여 KS F 3020에 의거하여 수행하였다(Fig. 1). 등급구분 결과를 반영하여 낙엽송 CLT는 C-E10-E8로 제작하고, 소나무는 C-E8-E6(등외)로 제작하는 것이 타당한 것으로 판단하였으며, 이후 핑거 조인트 접합, 접착제 도포 및 압제 등 KS F 2081에 의거하여 제조 공정을 수행하였다.

길이 방향의 접합은 KS F 3023에 의거하여 핑거 조인트로 접합하였다. 핑거 조인트 접합 시 핑거 골로부터 웅이 중심까지의 거리가 웅이 지름의 3배 이상의 거리로 접합하였다. 핑거 조인트 접착제로는 Diphenylmethane 4,4'-diisocyanate를 사용하였다.

CLT 제작에 사용된 접착제는 PRF(Phenol- Resorcinol- Formaldehyde)를 사용하였다. 도포량은 200 g/m²로 단면 도포하였고, 압제 압력은 1 MPa로 20시간 압제 후에 일주일간 양생하여 사용하였다.

KS F 2081에 의거하여 층재의 구성방식은 외층재와, 외층재를 제외한 모든 층을 의미하는 내층재로 구성되는 외층-내층 방식을 적용하였으며, 외층재 2매와 내층재 3매의 5-ply(150 mm)로 제작하였다. CLT는 Fig. 2와 같이 외층재부터 강축방향 층재와 약축방향 층재를 교차 적층하여 제작하였다. 제작된 CLT의 비중은 실험 결과 낙엽송 0.587, 소나무 0.476이었으며, 150 mm 두께를 고려하여 계산된 수종별 면밀도는 88.1 kg/m², 71.4 kg/m²였다. CLT 전체 크기는 1 m × 4.2 m 3매를 폭 방향으로 접합하여 시험편 설치 크기에 따라 두 수종의 최종 마감치수는 각각 폭 3 m, 길이 4.2 m로 제작하였다.

2.1.2. CLT 판재의 접합방식

CLT는 시공 현장에서 다양한 방법으로 접합하여 필요에 맞는 크기로 확장하여 사용할 수 있다. 본 실험에서는 CLT 접합방식별 비교를 위해 CLT 패널 간 측면 접합에 일반적으로 사용되는 spline, half-lap, butt 3가지 타입으로 제작하였다. 접합방식을 Fig. 3에 나타냈으며, 접합에 사용된 스크류는 rothoblaas사의 제품을 이용하였다. (a) spline 접합부는 직경 6 mm의 길이 80 mm의 HBS, (b) half-lap 접합부는 직경 6의 길이 130 mm의 HBS를 사용하였다. (c) butt 접합부는 길이 180 mm의 VGZ를 45° 각도로 교차하여 결합했다. 스크류 결합의 간격, 연단거리 및 끝면 거리는 Table 1과 같이 지정된 제조사 시방서의 최소값을 충족하도록 제작하였다. 접합방식에 따라서 목재의 역학적 성능인 전단 성능 등이 달라지나 본 연구에서는 차음성능에 초점을 맞추어 접합부의 단면 형태와 못 등으로 인한 음교(sound bridge) 현상 등 음향성능에 주목하여 검토하였다.

2.2. 측정 및 평가방법

2.2.1. 바닥충격음 측정 방법

측정은 KS F ISO 10140-3 바닥충격음 실험실 측정 방법에 의거하여 수행하였다. 실험은 Fig. 4와 같이 상하로 맞닿은 2개의 비정형 잔향실에서 수행되었다. Hoist를 이용해 실험실 중앙에 폭 3 m, 길이 4.2 m의 CLT 바닥체를 설치하였다. Fig. 5와 같이 가진실(상부층)의 중앙을 포함한 5개 지점에서 충격원을 가진하였으며, 모서리의 4지점은 바닥체의 테두리에서 75 cm 떨어진 지점에 배치하였다. 수음실(하부층)에는 5개의 마이크를 1.2 m 높이로 배치하여 측정하였다.

실험에 사용한 충격원을 Fig. 6에 나타냈다. (a) 고무공 충격원은 사람의 발걸음과 같은 무겁고 부드러운 충격을 모사한 중량 충격원이다. 고무공 충격원은 직경 185 mm이며, 두께가 30 mm의 실리콘 고무 소재로 속은 비어있는(hollow) 형태이다. 무게 2.5 ± 0.2 kg을 1 m 높이에서 자유 낙하하여, 약 1,500 N의 충격력을 발생시킨다. 고무공 충격원의 충격력 특성은 Fig. 7(a)와 같다. 평가주파수 범위 내 63 Hz에서 가장 강한 충격력을 발생하며, 500 Hz로 갈수록 그 충격력이 약해지는 특성을 가진다.

경량충격원은 구두굽 소리와 같이 비교적 가볍고 딱딱한 충격을 모사한 음원으로 Fig. 6(b)의 태핑머신을 사용하였다. 태핑머신은 500 g의 해머 5개가 일직선상에 배치되어 있으며, 해머가 순차적으로 초당 10회 낙하하여 충격력을 발생시킨다. 태핑머신의 충격력 특성은 Fig. 7(b)와 같다(Lietzén *et al.*, 2021). 평가주파수 범위 내에서 중고음역을 포함하는 충격력 특성을 가진다.

실험에 사용된 장비는 아래와 같으며, 실험에 사용된 8종의 바닥체를 Table 2에 정리하였다.

- Heavy weight impact source: Rion, YI-01
- Light weight impact source: B&K, Type 3207
- Free field microphone: B&K, Type 4189
- Recording software: B&K, BK connect
- Analyzer: B&K, Type 3160

2.2.2. 바닥충격을 평가 방법

바닥충격을 평가는 KS F ISO 717-2에 따라 수행하였다. 평가 주파수범위는 중량충격음은 50~630 Hz, 경량충격음은 100~3,150 Hz이며, 1/3 octave band로 산출하였다. 중량충격음의 단일수치평가량 ($L_{iA, Fmax}$)은 식 (1)을 사용하여 산출하였으며, 경량충격음의 단일수치평가량($L_{nT, w}$)은 식 (2), (3)을 사용하여 산출하였다.

$$X_{iA, Fmax} = 10 \log \sum 10^{(X_{iF_{max, j}} + A_j)/10} \quad (1)$$

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

$$L_i = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (3)$$

A_j : 주파수별 A가중 보정항

T_0 : 기준 잔향시간(0.5 s)

T : 수음실의 잔향시간(s)

L'_{nT} : 표준화 바닥충격음 레벨(dB)

L_i : 5개의 마이크로폰 위치의 음압레벨 측정 방법

3. 결과 및 고찰

3.1. 결과

3.1.1. 폭방향 접합방식에 따른 영향

접합방식에 따른 중량, 경량충격음 단일수치평가량을 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8에서 낙엽송 그룹(LS, LH, LB)과 소나무 그룹(PS, PH, PB) 모두 1 dB 내외의 차이로 나타났다.

Fig. 9에 접합방식에 따른 주파수별 측정값을 나타냈다. (a), (b)의 중량충격음 결과, 저음에서 큰 음압을 나타내고 중·고음으로 갈수록 음압이 줄어드는 경향을 보인다. (c), (d)의 경량충격음 결과는 중·고음역대에서 큰 음압을 보인다. 이는 충격원의 충격력 특성에 기인한 결과이다.

Fig. 9(a)에서 낙엽송 중량충격음의 접합방식별 결과, 125 Hz에서 측정값의 차이가 약 5 dB 발생했다. 또한 (b) 소나무는 80~125 Hz에서 측정값의 차이가 약 3 dB 발생했다. (c), (d) 경량충격음에서는 두 수종에서 그 차이가 모든 주파수대역에서

1~3 dB 수준으로 발생했다. 그러나 이러한 차이가 수중 변화에 따라 일관되게 나타나지 않아 접합부에 따른 고유의 특성이 있다고 해석하기에 어렵다고 판단된다. 또한, 그 차이가 주파수별로 1~5 dB 범위에서 발생하였으나, 단일수치평가량으로 산출하면 1 dB 차이에 불과한 수준이다.

본 연구에서는 중량충격음에서 청감적으로 크기 차이를 인지하는 레벨차를 의미하는 최소인지한계(just noticeable difference, JND)가 4 dB로 확인된 연구(Jeong, 2021)와 현행 주택법상 인정바닥구조 등급이 4 dB 간격으로 설정되어 있는 점을 고려하여 4 dB 이하의 차이는 바닥충격을 차단 성능에 유의미한 영향을 끼치지 않는 것으로 해석하였다.

접합방식에 따라 나타난 단일수치평가량 1 dB 차이는 스크류 체결로 인해 단면 간의 간격이 기밀하게 접합되어 하나의 면으로써 거동하기 때문으로 사료된다. 접합방식은 바닥충격음의 특성에 유의미한 영향이 없는 것으로 판단된다.

3.1.2. 수중에 따른 영향

접합방식이 바닥충격음에 영향을 미치지 않는다는 3.1.1.절의 결과를 바탕으로 접합방식에 따른 결과를 수중에 따라 각각 평균하여 Fig. 10에 나타냈다. 150 mm CLT의 수중에 따른 단일수치평가량 결과, 중량충격음은 낙엽송 평균 70 dB, 소나무 평균 71.7 dB로 나타났다. 경량충격음은 낙엽송 평균 78.3 dB 소나무 평균 79.7 dB로 확인되었다. 중량, 경량충격음 모두 1 dB 내외의 차이가 발생했다.

Fig. 11에 중량, 경량충격음의 주파수별 측정값을 정리하여 나타냈다. 150 mm half-lap 접합에서는 주파수별로 1~3 dB 차이가 발생했다. 그러나 이 차이는 Fig. 10과 같이 단일수치평가량으로 1 dB 내외 차이에 불과하다. 향후 CLT 제작 시 국내에서 CLT 제작에 주로 사용되는 낙엽송과 소나무는 차음 측면에서 수중에 상관없이 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.1.3. 두께에 따른 영향

바닥체의 두께 증가에 관한 연구에서 콘크리트 슬라브는 30 mm 증가 시 중량충격음에서 2 dB 감소되는 경향이 확인된 바 있다(Jeon et al., 2006). CLT 바닥체의 두께 증가에 따른 영향을 정량화하기 위해 CLT를 1장에서 2, 3장 적층하여 두께를 150, 300, 450 mm로 변화시켜 실험하였다. 강도 실험이 아닌 차음 실험임을 고려하여 두께 증가에 따른 접합을 사용하지 않고, 적층하여 바닥체를 구성하였다.

Table 3의 중량, 경량충격음 단일수치평가량 결과, 중량충격음은 150 mm가 69 dB로 나타났으며 300 mm는 63 dB로 나타나 약 6 dB 감소하였다. 또한 450 mm는 59 dB로 나타나 150 mm보다 10 dB 감소한 것으로 나타났다. 경량충격음은 150 mm가 78 dB로 나타났으며 300 mm가 67 dB로 나타나 약 11 dB 감소하였다. 또한 450 mm는 62 dB로 나타나 150 mm보다 16 dB 감소한 것으로 나타났다.

본 실험 결과를 바탕으로 CLT 바닥체의 두께에 따른 바닥충격음 차단 성능의 상관관계를 분석하였다. Fig. 13의 결과, 30 mm 두께 증가에 따라 중량충격음은 약 1 dB, 경량충격음은 약 1.6 dB 저감 되는 경향이 확인되었다. 두께에 따른 영향이 중량, 경량충격음에서 다르며, 경량충격음에서 더 효과적으로 나타났다. 경량충격음은 태핑머신의 충격력 특성에 따라 측정값에 중고음역 주파수를 포함하고 있다. 중고음역대는 파장이 짧아 물질 내부에서 에너지가 빠르게 소모되면서 저음에 비해 저감 효과가 크게 나타난다(Irwin et al., 1979). 이러한 충격원의 주파수 특성에 따른 저감량의 차이는 콘크리트 슬라브에서도 동일하게 나타난다(Yeon et al., 2017). 본 실험에서 확인된 중고음역의 감쇠는 Fig. 14의 주파수별 중량, 경량충격음 결과에서 그 양상을 확인할 수 있다.

이처럼 두께에 따른 영향 검토 결과, CLT 바닥체는 두께 증가에 있어 비용 대비 그 효과가 낮은 것으로 확인되었다. 두께 증가 외에 완충재를 적용해 mass-spring 효과를 이용하여 CLT 슬라브가 mass로, 완충재가 spring으로 역할을 하도록 설계하거나(Cremer et al., 1988; Schiavi et al., 2018) 최근 사용되는 CLT 위에 Concrete 판을 얹은 하이브리드 형태(Hassan et al., 2019)를 활용한 설계가 합리적일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 실험에서는 8종의 CLT 바닥체 실험을 통해 조건별 바닥충격음 차단 성능을 확인하였다. 접합방식(spline, half-lap, butt), 수종(낙엽송, 소나무), 두께(150, 300, 450 mm)별 단일수치평가량과 주파수별 결과에 대해 검토하였다. 연구의 주요 내용과 결과는 아래와 같다.

- 1) 접합방식에 따른 바닥충격음 실험 결과, 접합방식에 따른 바닥충격음 차단성능의 차이는 1 dB 내외로 나타나 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 접합방식별 차이가 적은 이유는 CLT의 단면이 스크류를 통해 체결되어 하나의 면으로

거동하기 때문에 판단된다.

- 2) 수중에 따른 바닥충격음 실험 결과, 두 수종의 단일수치평가량이 1 dB 내외 차이가 발생하여 수중에 따른 차이는 없는 것으로 판단 할 수 있다. 향후 국산 CLT 제작 시 사용되는 낙엽송과 소나무는 차음 측면에서 수중에 상관없이 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 두께에 따른 실험 결과, CLT 30 mm 증가에 따라 중량충격음은 1 dB, 경량충격음은 1.6 dB 저감되는 것으로 확인되었다.

이상으로 CLT의 바닥충격음 차단 성능을 기초 검토하였다. CLT 슬라브를 설계할 때는 두께 증가보다는 추가적인 완충재 또는 콘크리트와 결합한 하이브리드 바닥체를 이용하는 등의 추가적인 접근이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구는 대한민족산 목재를 활용한 CLT의 차단 성능을 검토하는 기초연구로써 의미가 있을 것으로 사료된다.