

구조용 직교 집성판 슬래브와 상부 토핑 조건에 따른 바닥충격음 및 공기전달음 평가

Evaluation of floor impact sound and airborne sound insulation performance of cross laminated timber slabs and their toppings

이효진,¹ 하연수,¹ 이상준^{1†}

(Hyo-Jin Lee,¹ Yeon-Su Ha,¹ and Sang-Joon Lee^{1†})

¹국립산림과학원

(Received August 31, 2023; accepted October 10, 2023)

초 록: 전 세계적으로 탄소중립 2050 실현을 위한 목조 건축물 수요가 늘어나고 있으며, 국내에서도 구조용 직교 집성판(Cross Laminated Timber, CLT)을 이용한 목조 고층 건축물에 대한 기술적 검토가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 CLT의 기초 음향성능을 검토하기 위해, 국내산 낙엽송과 소나무로 CLT 슬래브(두께 150 mm)를 제작해 바닥 충격음 차단 성능과 음향투과손실을 측정했다. 실험은 상하로 연결된 페어 잔향실에서 수행했으며, CLT 슬래브에 콘크리트 토핑(두께 50 mm ~ 210 mm, 6조건)을 추가해 차음성능 개선량을 정량적으로 평가했다. 수중에 따른 바닥충격음 차단 성능의 단일수치 평가량을 비교하면, 낙엽송 CLT가 소나무 CLT보다 중량 바닥충격음에서 3 dB, 경량 바닥충격음에서 1 dB 낮았으나, 상부에 콘크리트 토핑을 추가한 조건에서는 수종 간 차이가 없었다. 상부의 콘크리트 층 두께 상승에 따라 중량 바닥충격음이 9 dB ~ 20 dB, 경량충격음이 20 dB ~ 30 dB 저감했다. 이 관계를 면밀도로 분석한 결과, CLT 슬래브의 바닥충격음 차단 성능은 면밀도와 높은 상관관계($R^2 = 0.94 \sim 0.99$)가 있는 것을 확인했다. CLT 슬래브의 음향투과손실은 수중에 따른 차이가 없었다. 면밀도와 주파수로 산출한 음향투과손실 이론치와 실측치의 주파수 특성은 유사하지만 실측치가 8 dB ~ 12 dB 낮아, 보정치를 이용해 실험 대상인 CLT 슬래브의 음향투과손실과 주파수 특성의 관계를 도출했다.

핵심용어: 구조용 직교 집성판, 목조 주택, 바닥충격음, 음향투과손실, 면밀도

ABSTRACT: Demand for wood in construction is increasing worldwide. In Korea, technical reviews of high-rise Cross Laminated Timber (CLT) buildings are under way. In this paper, Floor Impact Sound Insulation Performance (FISIP) and Transmission Loss (TL) of 150 mm thick CLT floor panels made of two domestic species, *Larix kaempferi* and *Pinus densiflora*, are investigated. The CLT slabs were tested in reverberation chambers connected vertically. When comparing Single Number Quantity (SNQ) of FISIP of the bare panels, the Larix CLT is 3 dB lower in heavy-weight and 1 dB in light-weight than the Pinus CLT. However, there was no difference when concrete toppings were added to improve the performance. As the concrete toppings became thicker, the heavy-weight was reduced by 9 dB ~ 20 dB, and the light-weight by 20 dB ~ 30 dB. And the analysis of these results with area density has confirmed that the area densities are highly correlated ($R^2 = 0.94 \sim 0.99$) to the FISIP of the CLT. The types of CLT didn't affect the TL. Comparison of theoretical TL values with measured TL values has shown that the frequency characteristics are similar but 8 dB ~ 12 dB lower in measured values. The relationship between the TL and frequency characteristics of the tested CLT slabs was derived by using the correction value.

Keywords: Cross laminated timber, Wooden house, Floor impact sound, Transmission loss, Area density

PACS numbers: 43.50.Jh, 43.55.Ti, 43.55.Rg

†Corresponding author: Sang-Joon Lee (lsjoon@korea.kr)

National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Republic of Korea

(Tel: 82-2-961-2725, Fax: 82-2-961-2739)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

1.1 배경

전 세계적인 기후 변화에 적극적으로 대응하기 위해 우리나라를 비롯한 국제 사회는 2050년까지 탄소 실질 배출량 제로를 목표로 하는 탄소중립 2050 달성을 위해 전략적인 노력을 기울이고 있다. 목조 건축물은 탄소 저장 및 대체효과를 갖고 있어 국제 협약에서 인정하는 탄소 흡수원으로, 이미 북미, 유럽 및 일본에서는 건축산업에서 목재를 적극적으로 활용하고 있다. 국내에서도 목재 이용을 통한 탄소 저감의 필요성에 대해 공감하고 있으나, 목재가 건축 구조의 주재료로 사용되기 위해서는 구조 및 내화 성능뿐만 아니라 최근 사회적 문제로 대두되고 있는 바닥충격음 등 기초 성능에 관한 검토가 필요하다.^[1] 목재는 일반적으로 콘크리트와 비교하면 차음성능이 낮은 재료이다. 벽체의 공기전달음 차단 성능은 부재의 면밀도, 바닥체의 바닥충격음 차단 성능은 면밀도와 강성으로 결정되는 성능에 의존하기 때문이다. 한편, 북미 및 유럽에서는 구조용 직교 집성판 (Cross Laminated Timber, CLT)을 이용한 고층 주거 건축이 늘어나고 있으며, 국내에서도 2021년 CLT 제작 방법이 표준화되어 활용 방안에 대한 기대가 높아지고 있다.^[2] CLT는 전 세계적으로 사용이 일반화된 대표적인 공학목재로서 구조 안정성이 뛰어나 구조 계산 및 예측이 가능하며 층재 구성에 따라 강성 제어가 가능해 요구 성능에 따른 구조 설계가 가능한 CLT는 차음 성능에서도 보다 높은 성능이 기대되는 구조 재료이다. CLT를 이용한 목조 건축물의 연구는 국내보다 CLT 보급이 먼저 이루어진 북미 및 일본에서 활발하게 진행되고 있다.

1.2 선행 연구

1.2.1 바닥충격음 차단 성능

Tanaka *et al.*^[3]는 일본산 삼나무로 제작한 CLT 슬래브의 바닥충격음 차단 성능 및 바닥구조 개선을 통한 개선량을 실험실 측정을 통해 검토했다. CLT 바닥체(150mm, 210mm)를 경량목구조(2×4)바닥체, 콘크리트(150mm)바닥체와 비교한 결과 중량충격음은, 면밀도가 높은 콘크리트, CLT, 경량목구조의

순서로 우수했지만, 경량 충격음의 경우 경량목구조(2×4)가 가장 우수했으며 이것은 CLT 및 콘크리트 면슬래브 표면의 강도와 슬래브 내부의 진동감쇠가 작은 것에 기인한다고 보고했다. 또한 슬래브 상부에 건식 이중바닥을 설치한 결과 중량, 경량충격음에서 저감효과가 있었으나 그 경향이 CLT나 콘크리트가 달라, CLT 상부 구조의 차음성능을 검토하기 위해서는 실증적인 실험이 필요하다고 보고했다. Hirota *et al.*^[4]는 일본산 낙엽송과 전나무로 제작한 CLT 슬래브를 이용해 바닥충격음 차단 성능을 검토했다. 면슬래브 측정 결과, 낙엽송이 전나무보다 바닥충격음 차단 성능이 고무공 충격원 측정시 4dB정도 우수했으며 이 경향은 충격 시간내 응답 임피던스 레벨(impedance level in the impact time)의 차이와 유사한 것을 밝혔다. 또한 CLT 슬래브에 뜬바닥을 적용하면 7dB~13dB의 높은 개선 가능성이 있는 것을 확인했다. Zeitler *et al.*^[5] Hiramitsu와 Hirakawa^[6]는 CLT 슬래브 상부에 콘크리트 토퍼를 적용해 바닥충격음 차단 성능의 개선 효과에 관해 검토했다. Zeitler *et al.*^[5]은 CLT 슬래브에 고무 완충재, 목섬유 완충재 및 펠트 등과 함께 콘크리트 토퍼를 적용해 경량 바닥충격음 차단 성능을 검토했으며, 최대 21dB 감소했다고 보고했다. Hiramitsu와 Hirakawa^[6]는 CLT 슬래브 상부에 적용한 콘크리트 토퍼가 중량충격음을 크게 저감시켰다고 보고했다. 또한 콘크리트 토퍼 상부에 마감재를 설치하면, 경량충격음은 크게 개선되었지만 중량충격음에서는 거의 영향이 없다고 보고했다. Tanaka *et al.*^[7]는 CLT 슬래브 하부에 이중 천장을 설치해 차음성능 향상을 검토했다. 이중 천장에 통기구가 없을 경우, 경량충격음에서만 차음성능이 향상했고, 통기구를 설치하면 중량충격음에서도 성능이 향상한다고 보고했다. 또한 천장틀 하부에 모래주머니를 설치해 진동을 제어하면 천장이 없는 조건과 비교해 약 8dB의 성능 개선이 있었다고 보고했다.

1.2.2 공기전달음 차단 성능

Tanaka *et al.*^[8]는 CLT 패널 설치 시 발생할 수 있는 미세 틈새로 인한 공기전달음 차단 성능 저하에 관해 검토했다. CLT 연결부에 틈새가 있는 조건에서는 400Hz 이상의 대역에서 차음성능 저하가 있다고 보고했다. 단위 면적당 틈새의 길이로 CLT 패널의 음

향투과손실을 예측하는 식을 제안했으며, 이런 패턴 간 틈새는 유점토나 두께가 있는 실링 재료로 차음 성능 저하를 효과적으로 제어 가능하다고 보고했다. Schoenwald *et al.*^[9]은 CLT 건축물의 실간 공기전달음 차단 성능을 예측하기 위한 계산 모델을 제안했다. ISO 15712의 예측 모델을 바탕으로 CLT 부재의 실측 음향투과성능 및 바닥충격음 차단 성능을 계산에 적용해 측면 전달 차단 성능 및 음향투과성능을 검토했다. Hoeller *et al.*^[10]도 벽을 공유하는 CLT 건축물의 겹보기 차음성능을 산출하기 위한 연구를 수행했다. 벽체와 슬래브의 접합 형태에 따른 측로 진동 감쇠 및 다양한 CLT 부재의 음향투과성능 실측 결과를 이용해 음향투과성능 예측법을 제안했다.

1.3 연구 목적

앞에서 소개한 기존 연구에 따르면 CLT는 수중에 따른 성능 차이가 있으며, CLT 슬래브 상부 구조의 복잡한 영향 및 예측식의 제안에서도 실측을 통한 검토가 중요한 것으로 언급되고 있다. 국내산 CLT의 활용 확대를 위해서는 실증적인 검토를 통한 CLT의 차음성능 파악이 필요하다. 본 연구에서는 국내산 CLT를 대상으로 실험실에서 바닥충격음 차단 성능과 공기전달음 차단 성능을 측정했다. 수중에 의한 영향을 검토하기 위해 목재 수급이 원활한 국내산 낙엽송(*Larix kaempferi*)과 소나무(*Pinus densiflora*)를 검토 대상으로 선정해 수종과 차음성능에 관해 분석했다. 또한 기존 연구 사례를 고려해 프리캐스트 콘크리트판을 이용해 면밀도와 바닥충격음 차단 성능의 관계, 음향투과성능에 대해 검토했다.

II. 실험 개요

2.1 실험실

실험은 Fig. 1과 같은 방재시험연구원 음향실험동의 잔향실에서 실행했다. 이 철근 콘크리트조 잔향실은 상하로 2실이 연결된 구조이다. 상하 잔향실 사이에는 3,000 mm × 4,200 mm의 개구부(12.6 m²)가 있어 이곳에 시험체를 설치해 바닥충격음 차단 성능 및 공기전달음 차단 성능을 측정할 수 있다. 이 실험

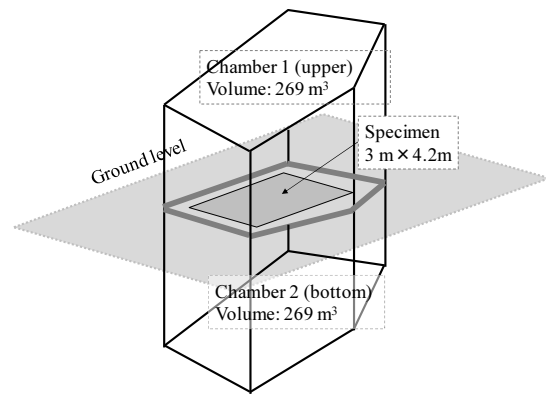


Fig. 1. Test rooms.

실 및 시험체 설치 조건은 KS F ISO 10140-3:2010^[11]에 따라서 진행했다.

2.2 시험체

본 연구에서는 2종류의 국내산 수종인 낙엽송과 소나무를 이용해 두께 150 mm(5 적층)의 바닥체를 제작했다. CLT 바닥체의 면밀도 증가와 바닥충격음 차단 성능 개선량과의 관계를 검토하기 위해 6종의 프리캐스트 콘크리트판을 제작해 실험에 이용했다. 또한 건설 현장에서 일반적으로 뜬바닥 구조에 사용되는 평판형 발포 폴리스티렌(Expanded Poly-Styrene, EPS)을 완충재로 선정했다.^[12]

2.2.1 CLT 슬래브

구조용 직교 집성판(CLT)은 장방향의 제재목을 층별로 직교 배치해 복수 층을 만들어 접착해 제작하는 공학목재이다. KS F 2081:2021^[13]에 따라서 품질 기준(Machine Stress Rating 기계 등급)을 만족하는 층재를 사용하며, CLT 최외측과 CLT 내층(최외측 이외의 층)의 강축 방향 휨강도와 탄성계수 값으로 등급이 정해진다.

CLT는 각 수종별로 1,000 mm × 4,200 mm를 3개를 제작해 너비 접합으로 시험체를 만들었다. 3개의 시험체는 Fig. 2와 같이 목조 주택에서 일반적으로 사용하는 스플라인 접합방식을 적용했다. 접합부는 폭 120 mm, 높이 30 mm, 길이 4,200 mm의 동일 수종 층재를 이용했으며 나사못(L80 mm, @150 mm)으로 구조적으로 문제가 없는 강도로 고정했다. 제작한 CLT

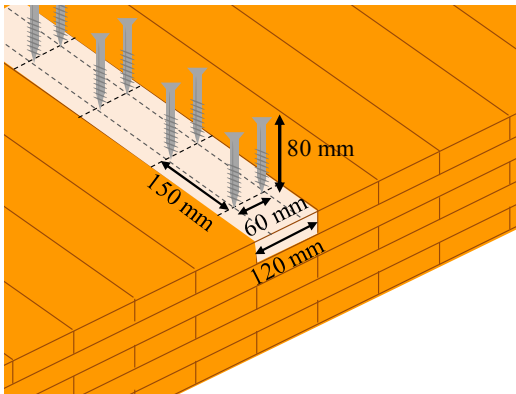


Fig. 2. (Color available online) Cross laminated timber : Spline joint.

의 비중 및 면밀도는 낙엽송이 0.587, 88.1 kg/m², 소나무가 0.476, 71.4 kg/m²이었다.

2.2.2 프리캐스트 콘크리트 판

기존 연구에 따르면 목재는 낮은 면밀도로 인해 콘크리트보다 중량바닥충격음 차단 성능이 낮지만, 상부구조의 개선으로 차음성능을 향상시키는 것이 가능하다.^[3,6,7] Zeitler *et al.*^[5]가 CLT 슬래브에 콘크리트 토핑(38 mm)의 적용 유무가 바닥충격음 차단 성능 향상에 지배적인 영향을 미치고 있다고 보고한 것을 참고해 콘크리트 토핑을 시험체에 적용했다. CLT 상부 토핑을 실험실에서 재현하기 위해 50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 210 mm로 총 6종의 프리캐스트 콘크리트판(Precast Concrete Panel, PC판)을 제작했다. 크기는 CLT 슬래브와 동일한 3,000 mm × 4,200 mm이다.

2.2.3 원충재

가장 보편적으로 사용되는 두께 30 mm, 동탄성계수 23.2 MN/m³인 평판형 EPS를 적용했다.

2.3 측정 방법

2.3.1 바닥충격음 차단 성능 측정 및 산출

측정은 KS F ISO10140-3: 2010^[14]에 규정된 중량 충격원(고무공)과 경량 충격원(태핑머신)을 사용해 바닥충격음 차단 성능을 측정했다. Fig. 3에 표시한 5점을 가진점으로 하고, 측정용 무지향성 마이크로폰(B&K, type 4189)은 수음실(하부 잔향실)에 5대를 설

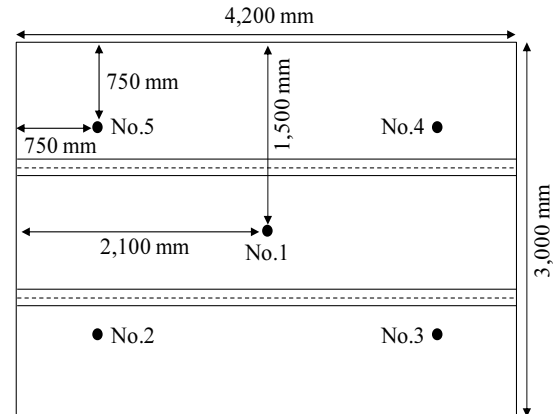


Fig. 3. Test material and exciting points (chamber).

치해 상부 가진을 통해 하부에 전해지는 충격음을 측정했다. 무지향성 마이크로폰으로 입력된 신호는 다채널 분석기(B&K, type 3099)를 통해 분석했다 (Table 1 참조).

중량 충격원은 50 Hz~630 Hz 대역의 1/3 옥타브밴드 A특성 최대 음압레벨을 측정해 KS F ISO717-2: 2020^[15]에 따라서 단일 수치 평가량인 A가중 최대 바닥충격음 레벨($L_{IA, Fmax}$)을 산출했다.

경량 충격원은 100 Hz~3,150 Hz 대역의 1/3 옥타브밴드 시간 평균 음압레벨을 측정하고, 수음실의 실측 잔향 시간으로 보정했다. KS F ISO717-2: 2020^[15]에 따라서 단일 수치 평가량인 가중표준화 바닥충격음 레벨($L_{nT,w}$)을 산출했다.

2.3.2 공기전달음 차단 성능 측정 및 산출

공기전달음 차단 성능은 KS F ISO10140-2: 2010^[16]에 따라서 측정했다. 음원은 광대역 랜덤 노이즈를 사용해 상부 잔향실에 설치한 무지향성 스피커(B&K, type 4292L)에서 재생하고, 음원실과 수음실에 각각 설치한 5대의 무지향성 마이크로폰(B&K, type 4189)으로 측정했다(Table 1 참조). 측정된 신호는 다채널 분석기(B&K, type 3099)를 통해 50 Hz ~ 5,000 Hz의 1/3 옥타브 밴드 음압레벨을 산출해 1/3 옥타브 밴드 음향투과손실을 산출하고 KS F 2862:2002^[17]에 근거해 단일수치 평가량 (D_w)을 산출했다.

2.4 실험 조건

실험 조건은 2 수종의 CLT 슬래브를 포함해, PC판

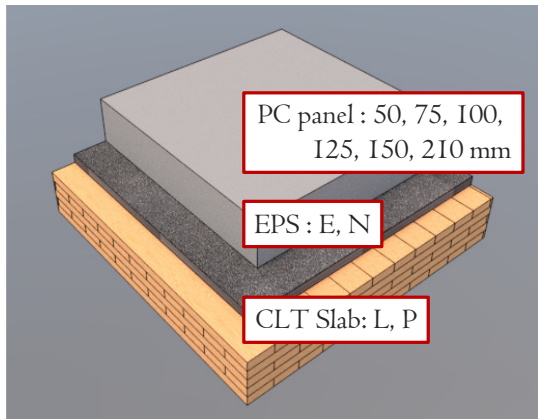


Fig. 4. (Color available online) Test case composition.

Table 1. Measurement instruments.

Item		Product number
Sound source	Impact ball	Rion, YI-01
	Tapping machine	B&K, Type 3207
Microphone	Omni-directional microphone	B&K, Type 4189
Speaker	Omni-directional speaker	B&K, Type 4292L
	Speaker amplifier	Inter-M, M700
Analyzer	Multi-channel analyzer	B&K, Type 3099

Table 2. Test case.

No	Case	EPS	PC panel (mm)	Area density (kg/m ²)	Thickness (mm)
1	L	-	-	88.1	150
2	L-050E	○	50	205.6	230
3	L-075E	○	75	264.3	255
4	L-100E	○	100	323.1	280
5	L-125E	○	125	381.8	305
6	L-150E	○	150	440.6	330
7	L-210E	○	210	581.6	390
8	L-075N	-	75	264.3	225
9	L-150N	-	150	440.6	300
10	L-210N	-	210	581.6	360
11	P	-	-	71.4	150
12	P-050E	○	50	188.9	230
13	P-075E	○	75	247.7	255
14	P-100E	○	100	306.4	280
15	P-125E	○	125	365.2	305
16	P-150E	○	150	423.9	330
17	P-210E	○	210	564.9	390
18	P-150N	-	150	423.9	300

과 EPS를 조합해 Fig. 4와 같이 만든 바닥구조 18종을 대상으로 했다. 낙엽송은 L, 소나무는 P로 표기하고, PC판의 두께(50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 210 mm), 완충재의 적용 유무(E: 적용, N:미적용)로 조건 이름(Table 2 참조)을 부여했다.

실제 건축물의 경우, 슬래브 상부 구조는 슬래브와 기밀하게 접착하도록 시공하지만 실험실 환경을 고려해 CLT 슬래브 또는 완충재 상부에 적층해서(비접착)실험을 시행했다.

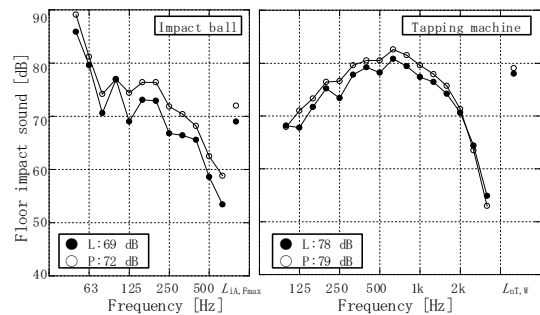
III. 실험 결과

3.1 바닥충격음 차단 성능

3.1.1 CLT 슬래브

낙엽송(조건 L) 및 소나무(조건 P)로 만든 CLT 슬래브의 측정 결과는 Fig. 5와 같으며, 범례와 함께 단일 수치 평가량을 표시했다. Fig. 5(a)의 중량충격음 측정 결과에 따르면, CLT 슬래브는 저주파수 대역에서 피크를 가지며 주파수 증가와 함께 바닥충격음 레벨이 작아지는 경향을 보이고 있으며, 이것은 콘크리트 슬래브의 측정 결과와도 유사한 주파수 특성이다.^[3]

낙엽송(조건 L)과 소나무(조건 P)의 주파수 특성은 매우 유사하지만 100 Hz를 제외한 전 주파수 대역에서 낙엽송이 소나무보다 약 2 dB ~ 5 dB 낮은 결과로 나타났다. 단일 수치 평가량인 A가중 최대 바닥충격음 레벨(L_{IA,Fmax})은 각각 69 dB, 72 dB로 그 차이는 3 dB이었다. 이것은 낙엽송(88.1 kg/m²)의 면밀도가 소나무(71.4 kg/m²)보다 높은 것이 영향을 미친 것으



(a) Heavy-weight (b) Light-weight

Fig. 5. Floor impact sound of CLT bare slabs.

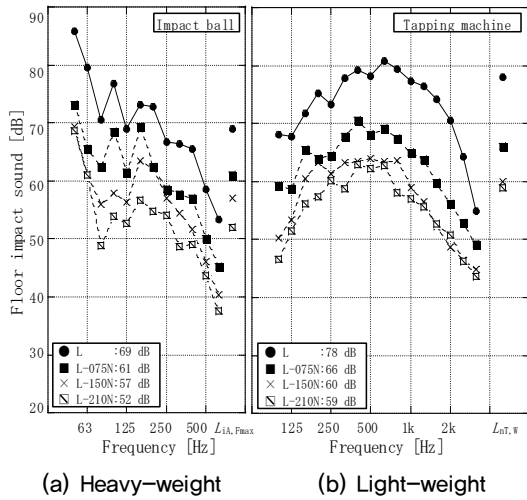


Fig. 6. Larix kaempferi CLT slab applied PC panel.

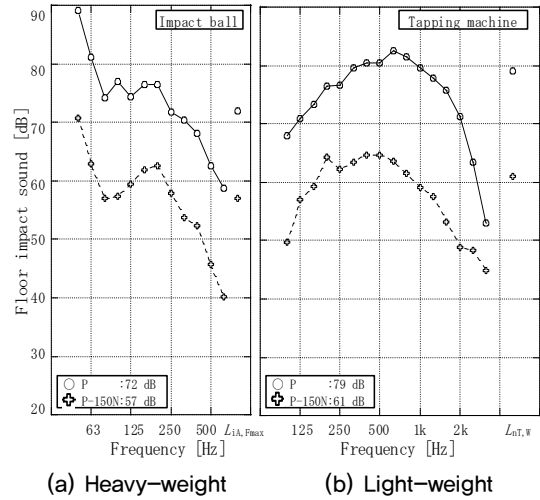


Fig. 7. Pinus densiflora CLT slab applied PC panel.

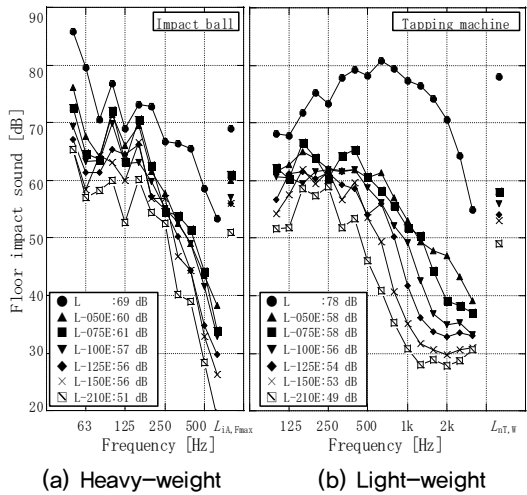


Fig. 8. Larix kaempferi CLT slab applied PC panel and EPS.

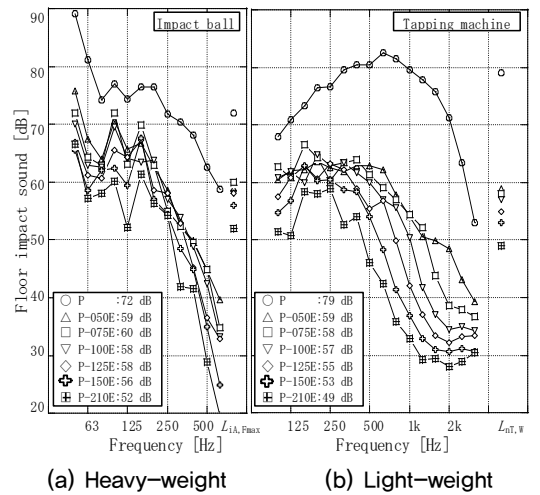


Fig. 9. Pinus densiflora CLT slab applied PC panel and EPS.

로 판단된다. 선행연구에 따르면 일본산 낙엽송(107 kg/m²)이 전나무(87 kg/m²)보다 높은 바닥충격음 차단 성능을 갖고 있다고 보고한 바 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서도 동일한 경향이 있었으며, CLT 슬래브에서도 면 밀도와 바닥충격음 차단 성능 사이에 상관관계가 있는 것을 추론할 수 있다.

경량충격음은 630 Hz 대역에서 피크를 갖고 있으며, 두 수종의 주파수 특성은 매우 유사하다. 대역별로 1 dB ~ 2 dB의 차이로 낙엽송이 소나무보다 약간 낮고, 단일 수치 평가량은 78 dB, 79 dB로 거의 비슷하다. 또한, 두 조건 모두 바닥충격음 레벨이 매우 높

아, 중량충격음뿐만 아니라 경량충격음에 대한 저감 대책이 필요하다.

3.1.2 PC판을 적용한 CLT 슬래브

CLT 슬래브에 PC판만 적용한 조건의 측정 결과를 Figs. 6과 7, PC판과 함께 완충재를 적용한 조건을 Figs. 8과 9, 단일수치 평가량을 Table 3에 표시한다. Table 2와 동일하게 낙엽송은 L, 소나무는 P로 표기하고, PC판의 두께(50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 210 mm), 완충재의 적용 유무(E: 적용, N:미 적용)를 나타낸다.

Table 3. Single number quantity of floor impact sound.

Case	Floor impact noise		Case	Floor impact noise	
	$L_{iA,Fmax}$ [dB]	$L_{nT,w}$ [dB]		$L_{iA,Fmax}$ [dB]	$L_{nT,w}$ [dB]
L	69	78	P	72	79
L-050E	60	58	P-050E	59	59
L-075E	61	58	P-075E	60	58
L-100E	57	56	P-100E	58	57
L-125E	56	54	P-125E	58	55
L-150E	56	53	P-150E	56	53
L-210E	51	49	P-210E	52	49
L-075N	61	66	-	-	-
L-150N	57	60	P-150N	57	61
L-210N	52	59	-	-	-

PC판을 적용한 조건

CLT 슬래브에 PC판만 적용한 조건의 단일수치 평가량(Table 3)을 보면, 낙엽송 CLT 슬래브(조건 L)에 PC판을 적용한 조건(L-075N, L-150N, L-210N)에서 중량충격음이 8 dB~17 dB, 경량충격음이 12 dB~19 dB 감소했다. 동일한 두께의 PC판을 적용한 조건(L-150N, P-150N)은 중량 및 경량충격음에서 차이가 1 dB 이하로 차이가 없었다.

완충재를 적용한 조건(Figs. 8과 9)의 단일수치 평가량을 비교하면, 동일한 PC판 두께를 사용한 조건에서 중량충격음은 차이가 0 dB~1 dB로 거의 없고, 경량충격음은 완충재가 없는 조건에 비해 7 dB~10 dB 크다.

Figs. 6과 7의 주파수 특성을 비교하면, 중량충격음의 경우 모든 조건이 유사한 주파수 특성을 갖고, PC판 두께에 따라 바닥충격음 레벨이 상하로 이동하고 있다. 경량충격음에서도 PC판 두께에 따른 주파수 특성의 변화는 없이 상하로 이동하고 있어 PC판 적용이 주파수 영역 변화에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단할 수 있다.

PC판과 완충재를 동시에 적용한 조건

단일수치 평가량(Table 3)을 보면, CLT 슬래브 조건(조건 L, P)에 PC판 50 mm와 완충재 30 mm를 적용(조건 L-050E, P-050E)하면 중량충격음이 9 dB~13 dB 감소, 경량충격음은 20 dB로 큰 폭으로 감소했다. 이것은 Figs. 8과 9에서 알 수 있듯이 전 주파수 영역

Table 4. Resonance frequency.

PC panel Thickness [mm]	50	75	100	125	150	210
f_0 [Hz]	71.1	58.0	50.3	45.0	41.0	34.7

에서 바닥충격음 레벨이 감소했으며, 중량충격음은 200 Hz 이하에서 5 dB~6 dB 이상, 250 Hz 이상에서는 약 10 dB 이상 감소했다. 경량충격음은 400 Hz 이하에서 약 10 dB, 500 Hz~2,500 Hz 영역에서 20 dB 이상 감소해 중-고주파수 영역의 큰 감쇠가 단일 수치 평가량 감소에 지배적인 역할을 한 것을 알 수 있다. 수중에 의한 차이는 CLT 슬래브의 경우 단일평가량이 중량충격음에서 3 dB의 차이가 있었으나, 상부에 완충재와 PC판을 적용한 조건에서는 수중에 의한 차이가 0 dB~2 dB로 거의 없었다. 수중에 의한 차이보다 상부층 구조에 의한 감쇠 효과가 지배적인 것이 원인으로 생각되며, 이러한 경향은 Hirota *et al.*^[4]의 보고에서도 동일했다.

Figs. 8과 9를 보면, PC판 두께가 50 mm인 조건(L-050E, P-050E)은 75 mm인 조건(L-075E, P-075E)의 결과와 거의 동일하지만, PC판 두께 증가에 따라 바닥충격음 레벨은 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 중량충격음의 경우 PC판의 두께가 증가해도 100 Hz, 160 Hz 대역에서 피크를 갖는 등 유사한 주파수 특성을 유지하며 바닥충격음 레벨이 감소했다. ISO 12354-2:2017^[18]에서 제시한 뜬바닥 구조의 공진주파수에 관한 예측식 Eq. (1)으로 PC판 두께별 공진주파수를 산출했다(Table 4).

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (1)$$

f_0 : 뜬바닥 구조 공진주파수 [Hz],

s' : 동탄성계수 [MN/m³],

m' : (누름층) 면밀도 [kg/m²]

Table 4에 따르면, 예측식으로 산출한 실험 조건의 공진주파수는 약 34 Hz~71 Hz 사이에 분포하지만 실험 결과[Figs. 8(a)과 9(a)]에서는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

경량충격음[Figs. 8(b)와 9(b)]은 PC판 두께 증가에 따라 주파수 대역 피크가 160 Hz~500 Hz에서 점점

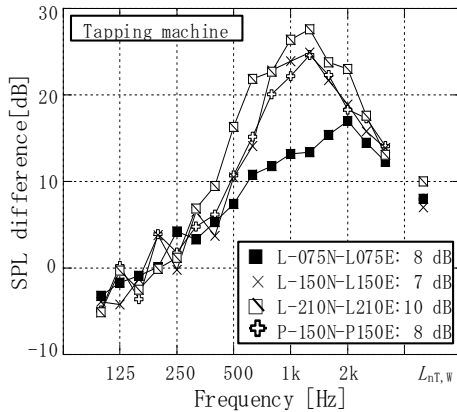


Fig. 10. SPL differences caused by EPS.

낮은 주파수로 이동하고 있다. 이것은 본 실험에 적용한 EPS의 동탄성계수의 물리적 성질과 상부에서 가해지는 PC판의 하중으로 인한 영향으로 판단되며, 상부 하중이 커질수록 높은 주파수 영역에서의 에너지 감쇠가 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

완충재의 영향

CLT 슬래브를 대상으로 한 실험에서도 콘크리트 슬래브와 동일하게 경량 바닥충격음은 완충재의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.^[19] 또한, 동일한 완충재를 사용하더라도 상부의 하중에 따라 주파수 영역별로 감쇠량에 차이가 있었다. Fig. 10는 같은 두께의 PC판을 사용한 조건에서 완충재 유무에 따른 경량 바닥충격음 레벨의 차이를 나타내고 있다.

Fig. 10에 따르면 160 Hz 이하의 영역에서는 완충재 유무의 차이가 거의 없지만, 200 Hz 이상에서는 주파수가 증가할수록 바닥충격음 레벨의 저감량이 커져 단일 수치 평가량의 차이는 8 dB~10 dB이었다. PC판의 두께가 커질수록 감쇠량이 증가하고, 대상 주파수 영역도 낮은 주파수 영역으로 확장되었다. 본 연구에서는 한 종류의 완충재를 대상으로 했으나, 다른 완충재를 대상으로도 추가 검토를 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3.1.3 면밀도와 단일 수치 평가량의 관계

바닥충격음 차단 성능에 영향을 미치는 면밀도가 CLT 슬래브에서도 평가 요소로서 적합한지 검토하기 위해 본 실험에서 적용한 18 조건의 면밀도를 산

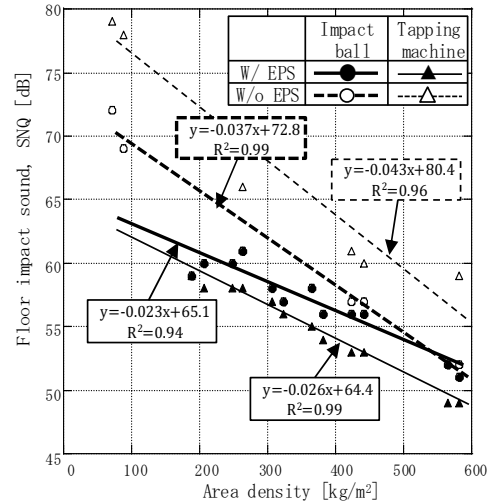


Fig. 11. Relationships between floor impact sound and area density.

출해 경량 및 중량 바닥충격음 차단 성능 단일 수치 평가량과의 관계를 고찰했다. 경량 바닥충격음 차단 성능이 완충재 유무에 따라 경향이 다른 것을 고려해, Fig. 11에 완충재 유무에 따라 면밀도와 경량 및 중량 바닥충격음 단일 수치 평가량과의 관계를 회귀 직선으로 표시하고 R²를 병기했다. 중량충격음은 완충재가 없는 조건에서 R²=0.99, 완충재가 있는 조건에서 R²=0.94로 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 경량충격음도 완충재가 없는 조건에서 R²=0.96, 완충재가 있는 조건에서 R²=0.99로 높은 상관관계를 나타냈다.

CLT 슬래브도 콘크리트 슬래브와 동일하게 면밀도와 바닥충격음 차단 성능이 높은 상관관계를 갖고 있으며, 같은 측정 조건에서 동일한 완충재를 사용할 경우 높은 비율로 바닥충격음 차단 성능이 예측 가능한 것을 확인했다.

3.2 공기전달음 차단 성능

3.2.1 CLT 슬래브

낙엽송과 소나무 CLT 슬래브의 음향투과손실 측정 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 단일층 판재의 경우 음원 입사 조건에 따른 질량 법칙에 따라 음향투과손실을 Eq. (2)로 예측할 수 있다.^[20] CLT 슬래브에 평면파를 가정한 음원이 수직으로 입사할 때의 음향투과손실 예측값을 Fig. 12에 같이 표시했다.

$$TL = 20 \log_{10}(f \times m) - 42.5. \quad (2)$$

TL : 음향투과손실 [dB],

f : 입사음 주파수 [Hz],

m : 면밀도 [kg/m^2]

Fig. 12의 실측치를 보면, CLT 슬래브의 음향투과손실은 낙엽송이 소나무보다 전 주파수 대역에서 약 1 dB~2 dB 높은 경향을 보이지만, 단일수치 평가량에서 낙엽송과 소나무가 각각 41 dB, 40 dB로 두 수종 간의 차이는 거의 없다. 또한 주파수 증가에 따라 투과손실이 커지는 특성을 갖고 있으며, 이것은 질량 법칙에 따른 예측식과도 유사한 특성을 보이지만, 측정치와는 8 dB~12 dB 정도의 차이가 있다. 이것은 음향투과손실 이론에서 가정하는 평면파 음원이 실제 시험실 음원 조건과 다르고, 시험실에 설치한 시험체의 크기 및 경계조건으로 인한 에너지 손실 등에 의한 차이로 사료된다. Tanaka *et al.*^[8]의 연구를 참고로 100 Hz~3,150 Hz 대역에서 주파수 f [Hz]와 본 시험의 측정결과에서 얻은 실측 음향투과손실 TL [dB]과의 관계를 회귀직선(최소자승법, $R^2 = 0.97$)으로 분석한 시험식을 Eq. (3)에 나타냈다.

$$TL = 23.5 \log_{10}(f) - 25.1. \quad (3)$$

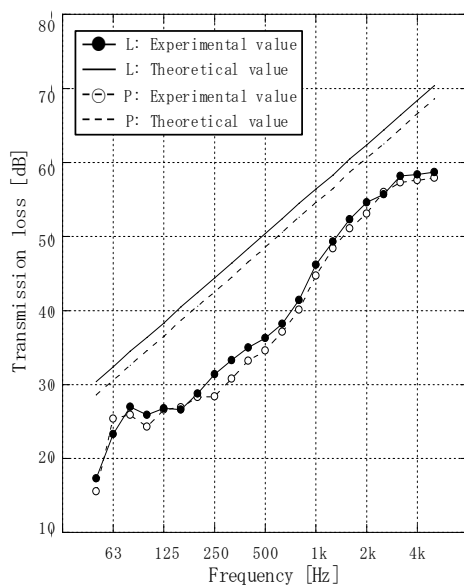


Fig. 12. Transmission loss of CLT bare slab.

CLT 제작은 일반적으로 길이 방향 확장은 자유롭지만, 너비 방향에 크기 제한이 있는 경우가 많다. 본 실험에서 사용한 CLT 슬래브도 너비 제한으로 인해 폭 1,000 mm의 CLT 3장을 제작해 하나의 시험체로 결합해서 사용했다. Hoeller *et al.*^[10]의 보고에 따르면, 바닥체의 너비 결합 시에 발생하는 미세한 틈으로 인한 차음 손실이 있을 수 있다고 지적하고 있다. 본 실험에서 사용한 시험체의 경우, 공기전달음 차단 성능 단일수치 평가량은 낙엽송이 41 dB, 소나무가 40 dB로 높은 차단 성능을 갖고 있고, Fig. 12와 같이 예측값과 실측값이 유사한 주파수 특성을 갖고 있다. 따라서, 적절하게 스플라인 접합을 적용할 경우 CLT 슬래브에서 미세 틈새로 인한 음교 현상이 일어날 가능성은 작다고 판단할 수 있다.

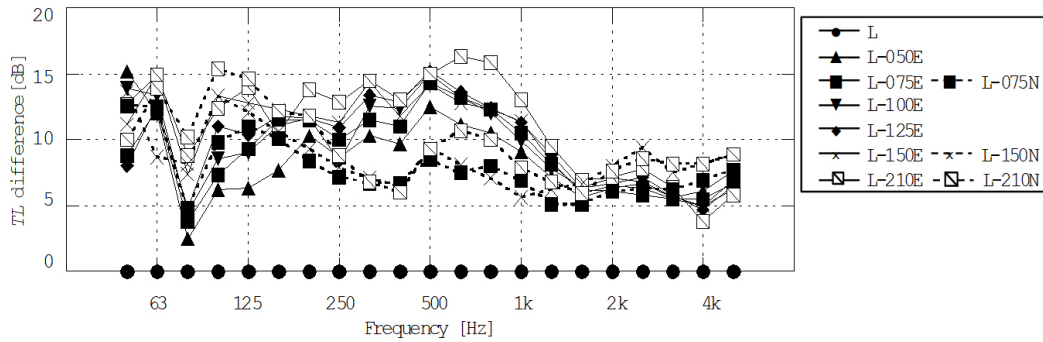
3.2.2 PC판을 적용한 CLT 슬래브

CLT 슬래브에 PC판을 적용한 조건의 단일수치 평가량을 Table 5에 표시한다. CLT 슬래브에 PC판 50 mm를 적용한 경우(L-050E, P-050E)가중 실간 음압 레벨차(D_w)가 낙엽송과 소나무에서 각각 10 dB, 12 dB로 크게 증가했다. PC판의 두께 증가에 따라 음향투과손실이 증가하는 경향을 보이지만 PC판 50 mm와 210 mm의 차이가 최대 5 dB로 그 차이는 크지 않았다.

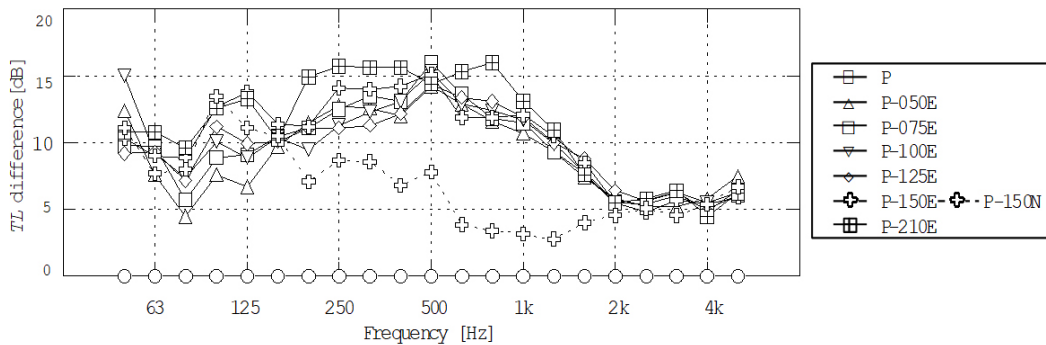
Fig. 13에 수종별 PC판 적용으로 인한 음향투과손실 증가량을 나타냈다. 음향투과손실 증가량도 수종에 의한 차이는 없었다. 완충재를 함께 적용한 조건은 적용하지 않은 조건보다 낙엽송 200 Hz~1,250 Hz 대역, 소나무 200 Hz~1,600 Hz 대역에서 음향투과손

Table 5. Single number quantity of airborne noise.

Case	D_w [dB]	Case	D_w [dB]
L	41	P	40
L-050E	51	P-050E	52
L-075E	53	P-075E	52
L-100E	53	P-100E	52
L-125E	54	P-125E	52
L-150E	54	P-150E	53
L-210E	55	P-210E	55
L-075N	49	-	-
L-150N	49	P-150N	46
L-210N	51	-	-



(a) Larix kaempferi CLT slab applied PC panel and EPS



(b) Pinus densiflora CLT slab applied PC panel and EPS

Fig. 13. Transmission loss of CLT slab applied PC panel.

실이 약 3 dB~14 dB 높았다.

음향투과손실의 경우 바닥충격음 차단 성능과 같이 PC판과 완충재를 적용함으로써 성능이 10 dB~15 dB로 크게 증가하는데 비해, PC판 두께 증가로 인한 효과는 최대 5 dB로 비교적 크지 않은 것으로 나타났다. 그에 비해 바닥충격음은 PC판 두께 증가로 인한 바닥충격음 감쇠 효과가 중량충격음에서 최대 9 dB로 비교적 컸다. 정확한 원인은 밝혀지지 않았지만, 바닥충격음의 경우 상부의 PC판과 CLT 슬래브가 접촉되지 않은 상태였기 때문에 공진의 영향을 적게 받았을 가능성이 있다고 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 국내산 낙엽송과 소나무로 만든 CLT 슬래브의 기초 차음성능을 검토했다. 또한 콘크리트 토퍼 및 완충재를 적용해 차음성능 향상의 가능성에 관해서도 검토했다.

바닥충격음 차단 성능에 관해서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 낙엽송 CLT 슬래브와 소나무 CLT 슬래브의 바닥충격음 차단 성능은 낙엽송 CLT가 중량충격음에서 3 dB, 경량충격음에서 1 dB 낮았다. 그러나 상부에 완충재 및 콘크리트 토퍼를 적용할 경우, 수중간의 차이는 0 dB~1 dB로 작았다. 이것은 수중에 의한 차이보다 상부층 구조에 의한 감쇠 효과가 지배적인 것이 원인이다.
- CLT 슬래브에 두께 50 mm~210 mm의 PC판을 적용한 경우 중량충격음이 9 dB~20 dB, 경량충격음이 20 dB~30 dB로 크게 감소해, CLT 슬래브에도 뜬바닥 적용으로 바닥충격음 차단 성능 향상이 가능한 것을 확인했다.
- PC판 적용한 조건에서, 중량충격음은 동일 조건에서 완충재 사용 유무에 따른 차이가 없었다. 경량충격음은 8 dB~13 dB의 차이가 있었고, 완충재를 사용한 조건에서 PC판 두께가 두꺼워질수록 피크가 나타나는 주파수가 저주파수 대역으로 이동하는 경향이 있었다.
- CLT 슬래브에서도 바닥충격음 차단 성능은 면밀도와 높은 상관관계를 나타내는 것을 확인했다(R^2

=0.94~0.99).

공기전달음 차단 성능에 관해서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 낙엽송 및 소나무 CLT 슬래브의 음향투과손실 단일 수치 평가량은 각각 41 dB, 40 dB로 높은 차단 성능을 나타내며, 수종에 따른 차이는 없었다.
- 선행 연구⁸⁾를 참고로, 본 실험의 측정으로 얻은 실측 음향투과손실과 주파수의 관계(최소자승법, $R^2 = 0.97$)를 분석해 다음과 같은 실험식을 도출했다.

$$TL = 23.5 \log_{10}(f) - 25.1$$

(f [Hz]: 주파수, TL [dB]: 음향투과손실)

- PC판을 적용하면 단일 수치 평가량이 10 dB ~ 15 dB 저감되지만, PC판 두께 증가로 인한 효과는 비교적 크지 않았다.

본 연구에서 수행한 검토 결과는 실험실 실험에 의한 측정 데이터를 이용하고 있다. 실제 건물에서 CLT 슬래브가 사용되는 경우에는 건축구조 및 슬래브의 크기, 접합부의 형식에 따라 바닥충격음 차단 성능이 영향을 받기 때문에 해석에 유의해야 한다. 또한, CLT 슬래브에서도 뜬바닥 구조를 통한 차음성능 개선 가능성을 확인한 것을 바탕으로, 앞으로 다양한 완충재를 이용한 CLT 슬래브 바닥구조의 성능 평가를 통해 실험 데이터를 축적할 예정이다.

References

1. J. H. Jeong and S. C. Lee, "A study on the annoyance and disturbance of floor impact noise according to noise sensitivity based on questionnaire survey" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **37**, 428-436 (2018).
2. H. J. Eom, S. K. Kong, and J. H. Park, "Based on structural type and fire resistance certification type a study on the analysis of high-rise wooden architecture" (in Korean), *J. Korea Institute of Spatial Design*, **14**, 177-186 (2019).
3. M. Tanaka, T. Murakami, Y. Kasai, and M. Kawai, "Floor impact sound insulation performance of CLT floor slab and reduction effect by floor coverings," *AIJ J. Technol. Des.* **23**, 903-908 (2017).
4. T. Hirota, G. Iizumi, M. Nobuo, and J. Miyauchi, "Floor impact sound insulation performance of floating floor method using CLT floor panel of small board made by Hokkaido," *Proc. AIJ Hokkaido Architectural Research Conference*, **93**, 173-176 (2020).
5. B. Zeitler, S. Schoenwald, and I. Sabourin, "Direct impact sound insulation of cross laminate timber floors with and with toppings," *Proc. Inter-noise*, 1-6 (2014).
6. A. Hiramitsu and S. Hirakawa, "Effect of concrete topping on floor impact sound insulation performance of CLT floor," *Proc. Inter-noise*, 1-8 (2022).
7. M. Tanaka, T. Murakami, and Y. Kasai, "Study on floor impact sound reduction effect by double ceiling system with cross laminated timber panels," *J. Environ. Eng. AIJ.* **82**, 543-550 (2017).
8. M. Tanaka, Y. Kasai, T. Murakami, and S. Kawatani, "Experimental study on airborne sound insulation of cross laminated timber panel walls," *J. Environ. Eng. AIJ.* **81**, 1075-1084 (2016).
9. S. Schoenwald, B. Zeitler, I. Sabourin, and F. King, "Sound insulation performance of cross laminated timber building system," *Proc. Inter-noise*, 1-10 (2013).
10. C. Hoeller, J. Mahn, D. Quirt, S. Schoenwald, and B. Zeitler, "Apparent sound insulation in cross-laminated timber buildings," *National Research Council Canada, Res. Rep.*, 2017.
11. KS F ISO10140-5:2021, *Laboratory Measurement of Sound Insulation Elements — Part 5: Requirements for Test Facilities and Equipment*, 2021.
12. W. H. Lee and C. H. Haan, "Characteristics of the floor impact sound by water to binder raion of mortar" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **40**, 671-677 (2021).
13. KS F 2081:2021, *Cross Laminated Timber*, 2021.
14. KS F ISO10140-3:2010, *Acoustics — Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Element — Part 3: Measurement of Impact Sound Insulation*, 2010.
15. KS F ISO717-2:2020, *Acoustics — Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements — Part 2: Impact Sound Insulation*, 2020.
16. KS F ISO10140-2:2010, *Acoustics — Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements — Part 2: Measurement of Airborne Sound Insulation*, 2010.
17. KS F 2862:2002, *Rating of Airborne Sound Insulation in Buildings and of Building Elements*, 2002.
18. ISO12354-2:2017, *Building Acoustics — Estimation of Acoustic Performance of Buildings from The Performance of Elements — Part 2: Impact Sound*

Insulation Between Rooms, 2017.

19. J. Y. Chung, H. S. Song, G. G. Song, and Y. J. Yoon, "Improvement of evaluation method for impact sound reduction performance of floor coverings" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **42**, 161-167 (2023).
20. K. sho, *Architectural Acoustics and Noise Prevention Measures* (Shokokusha Publishing Co., Ltd, Tokyo, 2012), pp. 1-238.

저자 약력

▶ 이 효 진 (Hyo-Jin Lee)



2004년 2월: 건국대학교 건축공학과 학사
 2009년 3월: 도쿄대학교 건축학 공학석사
 2013년 9월: 도쿄대학교 건축학 공학박사
 2021년 3월: 도쿄대학교 생산기술연구소
 특임조교수
 2022년 6월 ~ 현재: 국립산림과학원 박사
 연구원

▶ 하 연 수 (Yeon-Su Ha)



2013년 2월: 동아방송예술대학교 예술
 학사
 2021년 2월: 서울시립대학교 공학석사
 2023년 2월 ~ 현재: 국립산림과학원 석사
 연구원

▶ 이 상 준 (Sang-Joon Lee)



2003년 2월: 서울대학교 생물자원공학부
 학사
 2010년 9월: 서울대학교 산림과학부 농학
 박사
 2010년 12월: 서울대학교 농생명과학연
 구원 선임연구원
 2013년 6월: 국립산림과학원 박사연구원
 2013년 6월~현재: 국립산림과학원 임업
 연구사