현장실험을 통한 목조바닥의 구성요소가 충격음 차단성능에 미치는 영향 평가^{*1}

박 주 생^{*2†} · 이 상 준^{*2} · 김 세 중^{*2}

Evaluation on Effect of Constitution of Timber Framed Floor on Insulation Performance Against Impact Sound by Field Measurements^{*1}

Joo-Saeng Park^{*2†} · Sang-Joon Lee^{*2} · Se-Jong Kim^{*2}

요 약

바닥구조의 충격음 차단성능은 바닥의 구성요소에 의해 많은 영향을 받는데, 그중 목조 바닥구조의 경우 중량의 흡음층과 바닥구조의 강성이 주요한 영향인자로 고려되어 왔다. 본 연구에서는 국내 시공된 목조 건축물에 대해서 현장 실험을 통해 바닥 구성요소가 충격음 차단성능에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 목조 바닥의 충격음 차단성능은 상대적으로 낮은 저주파수 대역에서의 음압레벨에 의해 전체적인 성능이 좌우되었으며, 흡음층과 바닥구조의 강성 보강에 의해 저주파수 대역 음압레벨을 감소시켜 충격음 차단성능을 향상시킬 수 있었다. 특히, 바닥난방을 위해 설치되는 시멘트 몰탈층과 같은 충격음 흡수층과 원래 경간의 중간 지점에 보를 설치하여 장선 경간을 줄여줌으로써 목조 바닥의 강성을 증가시킨 경우에 중량 충격음 차단성능이 크게 향상되었다.

ABSTRACT

Constituents of timber framed floor affect the insulation performance against impact sound significantly. Among them, installation of massive sound absorbing layer and reinforcement of stiffness of timber floor have been considered as major factors that improve the insulation performance against impact sound. Researches on evaluating the effect of floor constitutions have been carried out through the field measurements for timber framed buildings in Korea. It is concluded that the impact sound pressure level at the relatively lower frequency governs the

^{*1} 접수 2012년 11월 5일, 채택 2012년 11월 25일

^{*2} 국립산림원 임산공학부, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 박주생(e-mail: jusang@forest.go.kr)

overall insulation performance, and can be improved by the installation of sound absorbing layer and reinforcement of floor stiffness. Especially, the insulation performance against heavy impact sound was improved significantly when the massive cement mortar layer for floor heating system was installed and the stiffness was reinforced by shortening the joist span using additional beam at the mid-position of original span.

Keywords: timber framed floor, impact sound insulation, floor stiffness, sound absorbing layer, heavy impact sound

1. 서 론

국내의 건축법규에 의하면, 공동주택에서 인접한 층 사이의 바닥은 충격음 차단성능에 있어서 가볍고 딱딱한 충격원에 의해 발생하는 경량 충격음의 경우 58 dB, 무겁고 부드러운 충격원에 의해 발생하는 중량 충격음에 대해서는 50 dB을 넘지 않아야 한다. 일반적으로 바닥구조의 충격음 차단성능은 거주자의 주거만족도와 관련이 있고 구조의 형태에 대해서는 고려하고 있지 않은 상태인데, 이러한 국내의 규정은 특히 중량 충격음 차단성능에 대해서 목조 바닥의 경우 다소 완화된 규정을 적용하는 국외의 기준(일본의 경우 55~60 dB)을 고려하면 매우 엄격한 것으로 생각되어진다.

목조건축물 바닥은 경량 충격음에 대해서는 바닥 구조 상부에 설치되는 바닥가감재와 소음채널의 설치 등 여러 가지 향상방안이 제시되어 규정을 만족하는 데 큰 어려움이 없는 것으로 알려져 있지만, 중량 충격음에 대한 차단성능은 그리 좋지 못한 것으로 알려져 있고, 국내의 주택건설기준 등에 관한 규정에 제시된 50 dB 이하를 만족하는 목조 바닥은 아직 제

시된 바 없다. 이러한 측면에서 현재의 규정을 만족하는 목조 바닥의 설계와 시공기술에 대한 준비가 반드시 필요하며, 이와 함께 목조건축물에 대한 충격음 차단성능에 대한 합리적인 기준의 제공도 요구되어 진다.

본 연구에서는 목조건축물의 충격음 차단성능 향상기술 개발을 위한 기초연구로서 목조 바닥의 구성 변화가 이러한 충격음 차단성능, 특히 중량 충격음 차단성능에 미치는 영향을 다양한 구성요소를 갖는 기존 목조건축물에 대한 현장실험을 통해 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

국내에 시공된 다양한 목조 건축물에 대한 충격음 차단성능 현장실험을 수행하여 바닥의 구성요소에 따른 성능을 평가하였다. 국내 자연휴양림의 숙박시설로 사용되고 있는 목조건축물의 2층 바닥에 대한 현장실험을 수행하였고, 4층의 모델하우스 용 다세

Table 1. Korean regulations of impact sound insulation performance for apartment house

Rating	Reversed A Weighted Normalized Floor Impact Sound Pressure Level for Light Impact Sound (dB)	Reverse A Weighted Floor Impact Sound Pressure Level for Heavy Impact Sound (dB)
1	$L'_{n,AW} \leq 43$	$L'_{iFmax,AW} \leq 40$
2	$43 < L'_{n,AW} \leq 48$	$40 < L'_{iFmax,AW} \leq 43$
3	$48 < L'_{n,AW} \leq 53$	$43 < L'_{iFmax,AW} \leq 47$
4	$53 < L'_{n,AW} \leq 58$	$47 < L'_{iFmax,AW} \leq 50$

Table 2. Information about field measurement buildings

Type of Building	Name of Building	Number of Tested Floors
Accommodation Buildings in Recreational Forests	SC	2
	WA	4
	HJ	2
	HM	4
Multi-family House	DH	1
Dormitory Building	HR	8

대 건축물과 2층의 주거용 경골목구조 건축물에 대해서는 바닥구조만 시공된 단계, 바닥구조 상부에 바닥난방을 위한 시멘트 몰탈층이 추가된 단계, 하부에 천장마감을 위한 석고보드가 시공된 단계 및 이중 천장 설치 또는 마감이 완성된 단계의 4개 시공단계별로 현장실험을 수행하였다. Table 2에 현장실험의 대상이 된 목조 건축물에 대한 정보를 제시하였다.

2.1.1. 자연휴양림 숙박시설

4개의 자연휴양림 숙박시설 건축물들의 2층 바닥에 대하여 바닥 충격음 현장실험을 KS F 2810-1과 KS F 2810-2에 준하여 각각 경량 충격음과 중량 충

격음 차단성능을 평가하였다. 실험대상 건축물의 전경을 아래의 Fig. 1에, 개별 건축물의 바닥구성을 Fig. 2에 각각 제시하였다.

2.1.2. 다세대 목조건축물

모텔하우스 용도로 시공된 4층의 다세대 건축물을 대상으로 목조 바닥의 구성이 바닥 충격음 차단성능에 미치는 영향을 살펴보고자 현장실험을 수행하였다. 실험은 4개의 시공단계, 즉 장선과 바닥덮개만 시공된 기본골조 단계, 바닥 상부에 바닥난방을 위한 시멘트 몰탈층 설치 이후 단계, 천장 마감을 위한 석고보드 시공 이후 단계, 그리고 최종 마감 이후 단계

(a) SC

(b) WA

(c) HJ

(d) HM

Fig. 1. General views of tested buildings of recreational forests in Korea.

Fig. 2. Constitutions of tested floors in each buildings of recreational forests.

Fig. 3. General view of 4-story multi-family house and schematic diagram of tested floor.

Fig. 4. Plan of tested floor area in 4-story multi-family house.

Fig. 5. General view of 2-story dormitory building.

Fig. 6. Basic floor constitution of 2-story dormitory building.

에 걸쳐 수행되었다. 본 건축물의 전경과 기본 구성 및 시공단계에 대한 개략도를 Fig. 3에 제시하였다.

4층의 다세대 건축물에서 실험대상 바닥은 Fig. 4에 제시된 바닥평면도에서 파란색 상자로 표시된 부분에 대해서 수행되었으며, 이는 본 건축물의 3층 바닥(세대간 경계바닥)에 해당된다. 그림에서 보는 바와 같이 바닥의 일부는 이중장선이, 나머지는 단일장선이 설치되어 있어 이들에 대한 효과도 살펴보았다.

2.1.3. 기숙사 건축물

2개의 2층 경골목구조 건축물(기숙사 용도)에 대해서 충격음 차단성능 실험실 측정을 수행하였으며, 본 건물의 전경을 Fig. 5에 제시하였다.

2층 건물은 2동으로 각 동이 4개씩의 방에 위아래

층에 배치되게 되고 결과적으로 8개의 2층 바닥에 대해 실험을 수행하였다. 각 방의 규격은 폭 3.6 m, 길이 6 m, 층고 2.7 m로 동일하고 모든 바닥은 기본적으로 38 mm × 235 mm의 I형 장선이 400 mm 간격으로 설치되었으며, 18.3 mm 구조용 OSB가 바닥덮개와 R-19의 단열성능을 갖는 유리섬유 단열재가 장선 사이에 채워진 조건은 모두 같았다.

위에서 설명한 기본 바닥구조의 상부에 20 mm 두께의 흡음매트가 동일하게 설치되었으며, 여기에 두께를 달리한 스티로폼 단열재와 시멘트 몰탈층이 설치되었다.

기본 골조의 하부에는 위의 표에 제시한 바와 같이, 일부의 바닥에는 목재 스트랩이 설치되었고, 모든 바닥에 400 mm 간격으로 소음채널이 설치되었

Table 3. Constituents of tested floors in 2-story dormitory buildings

Component	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Mortar Layer (mm)	50	50	50	50	75	75	50	50
Poly Styrene Foam (mm)	80	80	80	80	55	55	80	80
Sound Absorbing Matt	20 mm thick							
Floor Sheathing	183 thick OSB							
I-joist	38 mm × 235 mm at 400 mm spacing (Fiber glass thermal insulation, R-19)							
Wood Strap (18 × 38 mm)	-	○	○	-	○	-	-	-
Resilient Channel	attached to I-joist or wood strap at 400mm spacing							
Low Density Fiberboard (mm)	-	-	-	-	-	-	-	125
Gypsum Board (mm)	2 × 95	2 × 95	2 × 125	2 × 125	2 × 125	2 × 95	2 × 95	1 × 95

(a) Tapping machine

(b) Bang machine

Fig. 7. Light and heavy impact sources.

다. 그리고 하나의 바닥에 12.5 mm 두께의 저밀도섬유판이 설치된 것이 있으며, 석고보드는 두께와 매수를 달리한 조합이 각각의 바닥에 적용되었다.

Fig. 8. An example of evaluation procedure for determining single number rating against heavy impact sound.

2.2. 실험방법

모든 실험은 표준 경량 충격음과 중량 충격음을 사용하여 바닥구조의 충격음 차단성능 현장 측정방법 (KS F2810-1, 2810-)에 의해 수행되었다. 표준 경량 충격원으로는 태핑머신이 사용되었고, 중량 충격원으로는 뱅머신이 사용되었다. 모든 바닥의 상부에서 충격원에 의하여 충격음을 발생시켰고, 바닥의 아래에 있는 방에서 음압레벨 데이터를 획득하였다. 데이터 획득은 아래 방에서 중간 지점을 포함하여 균일하게 분포시킨 5개의 마이크로폰과 이들과 연결된

현장실험을 통한 목조바닥의 구성요소가 충격음 차단성능에 미치는 영향 평가

Fig. 9. Insulation performance against impact sound for SC building.

Pulse 3560 (B&K 사)에 의해 이루어졌다.

획득된 음압레벨 데이터는 KS F 2862-1과 2862-2에 제시된 방법에 준하여 단일수치 평가량으로 산출하였다. 경량 충격음에 대해서는 125, 250, 500, 1,000, 2,000 Hz의 5개 중심주파수의 값을, 중량 충격음에 대해서는 63, 125, 250, 500 Hz의 4개 중심주파수의 값을 기준곡선과 비교하여, 측정된 값이 기준곡선을 상회하는 값의 합계가 경량 충격음은 10 dB, 중량 충격음은 8 dB 이내가 되도록 할 때 기준곡선에서의 500 Hz에 해당하는 음압레벨을 단일수치 평가량으로 각각 산출하였다. 이에 대해서는 Fig. 8에 예시를 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바닥구성에 따른 충격음 차단성능

자연휴양림 숙박시설에 대한 바닥 충격음 차단성능 현장실험을 통해 과연 기존 목조건축물이 국내 충격음 관련 규정을 만족할 수 있는지의 현재 수준을 평가할 수 있었다. 결과적으로 경량 충격음에 대해서는 대체로 국내 규정(58 dB)을 만족하는 수준이었으나, 중량 충격음에 대해서는 만족하지 못하였다.

먼저, SC 자연휴양림 숙박시설 바닥의 결과를 살펴보면, 2개의 바닥 모두 51과 50 dB의 경량 충격음 차단성능을 보여 모두 규정을 만족하였으나, 중량 충격음에 있어서는 61과 57 dB로서 규정을 만족하지

Fig. 10. Insulation performances against light impact sound for WA buildings.

Fig. 11. Insulation performances against heavy impact sound for WA buildings.

현장실험을 통한 목조바닥의 구성요소가 충격음 차단성능에 미치는 영향 평가

Fig. 12. Insulation performance against impact sound for HJ building.

못하였다. 이 바닥들은 35 mm × 90 mm × 248 mm의 포지스트리트러스 부재를 600 mm 간격으로 배치한 골조에 18.3 mm 두께의 구조용 OSB를 바닥덮개로 사용하고, 여기에 10 mm 두께의 흡음매트, 50 mm 두께의 스티로폼 단열재와 40 mm 두께의 몰탈층을 상부에 설치하였고, 9.5 mm 두께의 석고보드와 12 mm 두께의 목재 내장재를 천장에 설치한 것이었다.

WA 자연휴양림의 숙박시설 4개의 바닥에 대한 실험결과를 다음의 Figs. 10과 11에 나타내었다. 경량 충격음에 대해서는 4개 바닥 모두 50~55 dB의 값을 보여 국내 규정을 만족하였으나, 중량 충격음에 대해서는 4개 바닥 모두 만족하지 못하였는데, 이 중 가장 좋은 결과가 56 dB이었고 이는 바닥면적이 상대적으로 넓은 바닥의 경우로서 실용적의 증가에 의한 효과로 판단된다. WA의 바닥들은 38 mm × 302 mm

의 I형 장선이 406 mm 간격으로 배치되고 12.5 mm 두께의 흡음보드와 12.5 mm 두께의 석고보드가 설치되었지만, 중량 충격음을 흡수할 수 있는 중량의 흡음층이 없었던 것이 중량 충격음 차단성능 저하를 야기한 것으로 보인다. 이는 단적으로 63Hz 중심주파수 대역에서 4개 바닥 모두 90 dB에 가까운 음압 레벨 값을 보이고 있는 것으로 확인할 수 있다.

2개의 바닥구조에 대해 실험한 HJ 자연휴양림의 경우에는 하나의 바닥에서 경량 충격음에 대해서도 국내 규정을 만족하지 못했는데, 이는 실용적이 매우 작은 것에 기인된 것으로 판단되며, 중량 충격음도 64와 60 dB로서 성능이 좋지 않았다. HJ 바닥들이 38 mm × 235 mm 소재 장선을 406 mm 간격으로 설치된 것으로는 중량충격음 규정을 만족시키는데 충분치 못한 것으로 판단되고, 실용적이 작은 경우에 4 dB

Fig. 13. Insulation performances against light impact sound for HM buildings.

Figure 14. Insulation performances against heavy impact sound for HM buildings.

Table 4. Test results against light impact sound for DH floor according to construction stages and positions

Stage	Sound Pressure Level (dB)				
	S to S	S to T	D to D	D to T	T to T
Bare Floor	91	93	91	95	93
With Mortar	76	78	76	78	78
With Ceiling	60	63	60	63	63
With Down-ceiling	52	54	51	54	54

Fig. 15. Change of sound pressure levels at four construction stages against light impact sound in DH building.

정도의 중량 충격음 차단성능 향상을 보였다.

4개의 바닥에 대한 HM 자연휴양림 숙박시설의 실험결과에서는 49~56 dB의 훌륭한 경량 충격음 차단성능을 보였으며, 51~55 dB의 상대적으로 좋은 중량 충격음 차단성능도 나타내었다. 비록 국내 규정인 50 dB에는 다소 못 미치는 결과였지만 중심주파수 63 Hz 대역에서 다른 건물들과 비교해 상대적으로 낮은 79~85 dB의 음압레벨을 보임으로서 국내 기준을 만족할 수 있는 가능성을 제시하고 있다고 사료된다. HM 바닥들은 38 mm × 235 mm의 소재 장선을 400 mm 간격으로 배치하고 18.3 mm 두께의 구조용 OSB를 바닥덮개로 사용하였으며 15 mm 두께의 석고보드를 설치한 것, 그리고 12 mm 두께의 흡음매트, 40 mm

두께의 시멘트 몰탈층과 10 mm 두께의 목재 바닥마감재를 사용한 것만 보면 다른 바닥들과 크게 다르지 않았으나 바닥의 중간에 장선의 스펠을 1,500 mm 정도로 줄이게 하는 13 mm × 381 mm의 구조용 집성재가 추가된 것이 특징이라 할 수 있다. 보강된 집성재에 의한 장선 스펠의 감소가 바닥구조의 강성 증가로 이어져 중량 충격음 차단성능이 향상된 결과로 연결된 것으로 판단된다.

3.2. 바닥 구성요소의 정량적 영향

4층의 다세대 건물(DH)과 2층의 기숙사 건물(HR)에 대한 4개 시공단계별 바닥 충격음 차단성능 현장

Table 5. Test results against heavy impact sound for DH floor according to construction stages and positions

Stage	Sound Pressure Level (dB)				
	S to S	S to T	D to D	D to T	T to T
Bare Floor	75	76	77	75	75
With Mortar	58	58	62	58	58
With Ceiling	65	66	64	62	65
With Down-ceiling	56	57	52	53	56

Fig. 16. Change of sound pressure levels at four construction stages against heavy impact sound in DH building.

실험을 통해 바닥을 구성하는 요소들의 영향을 정량적으로 평가해 보았다.

DH 건물의 경우, 앞서 언급한 바와 같이 골조 자체만(Bare Floor), 상부 흡음층 설치 이후(With Mortar), 천장 석고보드 설치 이후(With Ceiling) 및 추가 이중천장 설치 이후(With Down-ceiling) 단계별로 측정한 결과를 아래의 Table 4와 Table 5에 제시하였다. DH 건물의 바닥의 일부가 이중장선이 설치된 점을 고려하여 충격음 발생 위치와 데이터 획득 위치에 따라 5개의 조합에 대해 실험결과를 표시하였다. Table 4와 Table 5에서 S는 단일장선 D는 이중장선, T는 바닥 전체를 의미하며, 예를 들어 D to T의 경우 충격음 발생은 이중장선 위에서만 하고 데이터 획득

은 바닥 전체로 한 경우를 의미한다.

경량 충격음의 경우, 흡음층으로 시멘트 몰탈층이 추가된 이후 약 15 dB의 차단성능 향상을 나타내었고, 천장 석고보드 설치 이후 추가적인 15 dB, 또한 이중천장 설치 이후 8~9 dB의 추가적인 향상을 보였으며, 최종적으로 51~54 dB의 경량 충격음 차단성능을 보여 국내 규정을 충분히 만족하였다.

각 시공 단계별로 바닥 전체에 대한 결과를 보면 (Fig. 15) 바닥구조 상부에 시멘트 몰탈층 설치로 인해 저주파수 대역의 음압레벨이 줄어들었고, 천장 석고보드 설치 이후 고주파수 대역의 음압레벨이 순차적으로 감소하였으며, 이중천장의 설치로 전 주파수 대역에서 4~5 dB의 음압레벨 감소를 보였다.

Table 6. Test results against light impact sound for HR floors

Stage	Sound Pressure Level (dB)							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Bare Floor	90	89	-	-	-	-	-	-
With Mortar	80	78	-	-	-	-	-	-
With Gypsum	63	64	65	61	63	-	66	-
Finished	64	66	64	65	65	64	66	61

Table 7. Test results against heavy impact sound for HR floors

Stage	Sound Pressure Level (dB)							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Bare Floor	76	75	-	-	-	-	-	-
With Mortar	60	57	-	-	-	-	-	-
With Gypsum	65	62	61	62	59	-	61	-
Finished	68	67	66	67	61	63	67	65

DH 건물 바닥의 중량 충격음에 대한 결과를 보면, 시멘트 몰탈층의 설치로 인해 15~18 dB 정도의 음압레벨 감소를 보였으나, 이후의 시공단계에 있어서는 향상되지 않았다. 실험과정에서 골조만을 측정한 경우 공간이 충분히 막혀 있지 않았던 점과 시멘트 몰탈층의 경화가 충분하지 않은 시점에서 실험이 이루어진 점을 고려하여, 시멘트 몰탈층과 천장 석고보드 설치의 영향을 함께 보면 약 15 dB의 중량 충격음 차단성능 향상을 보인 것으로 보여진다. 그리고 이중 천장 설치는 8~11 dB의 추가적인 향상에 기여함을 알 수 있었다. 이중장선이 설치된 부분이 단일장선 부분과 비교하여 4 dB 정도의 차단성능 향상을 보였고, 결과적으로는 52~57 dB의 중량 충격음 차단성능을 보여 국내 규정인 50 dB에는 미치지 못하였다.

8개의 다른 바닥구성을 갖는 2층 기숙사 건물(HR)에 대한 현장실험 결과를 4개의 시공단계별, 즉 골조 설치(Bare Floor), 상부 흡음층 설치(With Mortar), 석고보드 설치(With Gypsum) 그리고 마감 이후(Finished) 단계별로 살펴보았다.

시공 단계별 영향은 앞선 DH 건물과 유사한 결과를 보였지만 바닥 구성요소에 따른 차이는 경량과 중량 충격음 모두에서 크게 나타나지 않았다. 다만, 경

량 충격음의 경우 Room 8에서 저밀도 섬유판과 석고 보드를 함께 천장에 시공한 경우가 가장 좋은 결과를 보였고, 중량 충격음의 경우에는 시멘트 몰탈층의 두께를 75 mm로 상대적으로 두껍게 하고 12.5 mm 두께의 석고보드를 2층으로 설치한 경우가 가장 좋은 결과를 보였다.

4. 결 론

다양한 바닥구성을 갖는 목조건축물의 바닥구조에 대한 충격음 차단성능의 현장실험을 수행하였고, 구성요소의 영향을 살펴본 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 목조 바닥의 충격음 차단성능은 바닥구조의 강성, 상부 흡음층 및 천장 마감층의 통합된 형태로 영향을 받는다.
2. 상대적으로 저주파수 대역에서의 음압레벨 감소를 통해 전체적인 충격음 차단성능의 향상을 도모할 수 있다.
3. 중량 충격음 차단성능은 바닥난방에 사용되는 시멘트 몰탈층과 같은 충격음 흡수층과 바닥장선의 스펙을 줄여주는 추가적인 보의 설치를 통한 바닥구

조의 강성 보강의 방법으로 현저히 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부. 2009. 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리 기준. 국토해양부 고시 제2009-658호.
2. 안병준, 백기현. 2011. 목탄을 이용한 친환경 건축자재 이용기술(II). 목탄 함유 건축자재의 에너지 절감 및 차음 특성에 관한 연구. 목재공학 39(1): 41~52.
3. 한국표준협회. 2001. KS F 2810-1, 바닥 충격음 차단성능 현장 측정 방법 - 제1부 : 표준 경량충격원에 의한 방법.
4. 한국표준협회. 2001. KS F 2810-2, 바닥 충격음 차단성능 현장 측정 방법 - 제2부 : 표준 중량충격원에 의한 방법.
5. 한국표준협회. 2002. KS F 2863-1, 건물 및 건물 부재의 바닥 충격음 차단 성능 평가 방법 - 제1부 : 표준 경량충격원에 대한 차단 성능.
6. 한국표준협회. 2007. KS F 2863-2, 건물 및 건물 부재의 바닥 충격음 차단 성능 평가 방법 - 제1부 : 표준 중량 충격원에 대한 차단 성능.
7. Dodd, G., G. Emms, K. McGunngle, and G. Schmid. 2006. Findings from listening to impacts on floors, New Zealand Acoustics, 19(3): 17~24.
8. Hu, L. and R. Desjardins. 2012. Case study of low-frequency footstep sound transmission through wood floor-ceiling assemblies and FPInnovations' research framework. Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Vol. 2: 41~44.
9. Park, J. S., K. H. Hwang, and G. Y. Jeong. 2012. Effect of stiffness reinforcement on insulation performance against impact sound in timber framed floor. Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Vol. 1: 101~102.
10. Wakefield C. W. 1999. Control of low-frequency footstep sound & vibration transmission through a wood framed concrete-topped floor. Journal of the Canadian Acoustics Association, 27(3): 16~117.