

유한요소법을 활용한 3D Textile 구조적용에 따른 층간소음저감 연구

A Study on Interlayer Noise Reduction through Application of 3D Textile Structures using Finite Element Method

이재민¹, 장일영^{2*}

Jae-Min Lee¹, Il-Young Jang^{2*}

〈Abstract〉

In this study, focuses on noise reduction between floors in the civil and architectural fields. Specifically, it investigates the application of newly developed 3D Textile to slabs to reduce interfloor noise. The effect of 3D Textile, through performance analysis via experiments and noise analysis using finite element method, provides a new understanding of noise reduction technology, and is expected to contribute to the improvement of living quality in residential spaces.

Keywords : Inter-floor Noise Reduction, 3D Textile, FEM, Noise Analysis

1 정회원, 주저자, 금오공과대학교 토목공학과, 박사과정

1 Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology, Ph.D. program

2* 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 토목공학과, 교수

2* Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology, Professor

E-mail: jbond@kumoh.ac.kr

1. 서론

최근 몇 년 동안, 아파트의 층간소음 문제는 주거 환경의 중요한 이슈로 부상하였다. 아파트 거주자들 사이에서 소음 문제는 심각한 불편함을 초래하며, 이는 생활의 질을 저하시키고, 심지어는 이웃 간의 갈등을 유발하기도 한다. 2021년 통계청 통계개발원 통계자료에 의하면 Fig. 1과 같이 2020년에는 코로나19의 영향으로 층간소음 민원이 4만2,250건으로 2019년 대비 1.6배 증가하였다. 또한 층간 소음으로 인한 사건 사고는 매년 증가추세이며, 이는 Fig. 2와 같이 이웃 간의 폭행 및 살인미수, 나아가 살인으로까지 이어지고 있다[1]. 이러한 사회적 문제로 인한 층간소음을

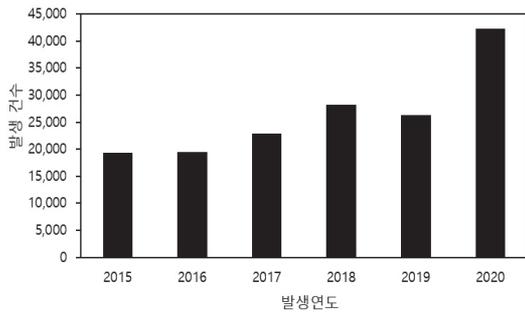


Fig. 1 Number of complaints about noise between floors

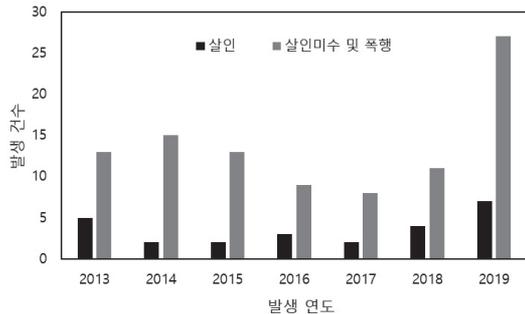


Fig. 2 Murder and violent crime caused by noise between floors

정량적으로 확인하기 위해 현장 측정을 2014년부터 진행하였지만 Table 1에서처럼 90%이상 법적 기준을 충족하여 층간소음에 대한 연구개발의 필요성이 강조되지 않는 상황이다.

Table 2에서처럼 층간소음의 주요 원인은 ‘뛰거나 걷는 소리’로 이러한 소음은 공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙에 따라 48dB 미만의 중량충격음으로 분류된다[2]. 이렇듯 층간소음에 대한 기준과 해결책이 필요한 가운데 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 방법들이 제안되고 있다.

Table 1. Inter-floor noise field diagnostic measurement results

연도	기준 초과		기준 이내	
	건	%	건	%
2014	17	21.0	64	79.0
2015	15	9.4	144	90.6
2016	5	2.5	198	97.5
2017	24	5.9	385	94.1
2018	32	7.6	387	92.4
2019	35	7.6	427	92.4
2020	18	9.8	165	90.2
총계	146	7.6	1,770	92.4

Table 2. Number of complaints about noise between floors by cause of noise (accumulated)

소음 원인	2012-2020년 접수건수(건)	비율(%)
뛰거나 걷는 소리	40,598	67.6
망치질	2,588	4.3
가구	2,224	3.7
문 개폐	1,184	2.0
가전제품	1,699	2.8
악기	927	1.5
기타	10,841	18.1
계	60,061	100.0

2. 3D Textile 소음 저감제 개발

본 연구에서는 중량충격음에 의한 소음을 저감시키기 위해 3D Textile을 개발하였다. 3D Textile은 Fig. 3과 같이 구성되며 소재는 Polyethylene으로 이루어져 있다. Textile의 섬유가닥 사이 내부 공간은 제작단계에서 모르타르를 침투시켜 타설 후 최종적으로 Fig. 4와 같이 제작된다. 제작된 제품은 바닥구조의 마감 모르타르 상부 또는 하부에 부착하여 충격에 대한 진동을 흡수할 수 있으며, 이를 통하여 소음저감 효과를 기대할 수 있다.

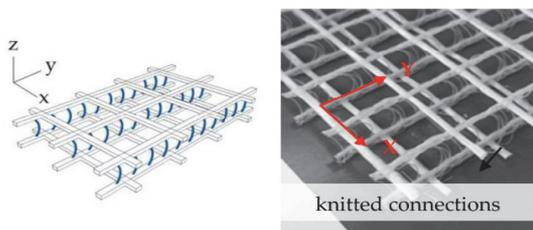


Fig. 3 3D textile schematic diagram



Fig. 4 3D Textile noise reduction agent

3. 구조 분석

국내 시공되는 공동주택의 바닥구조는 콘크리트 슬래브 위에 완충재, 모르타르, 마감재 등으로 이루어져 있다. 바닥구조는 바닥충격음 차단 구조기준 제2조 4에 의해 세 가지로 분류된다[3]. 그중 국내에서는 층간소음에 대한 사회적 이슈로 인해 Fig. 5와 같이 완충재의 두께가 40mm 이상으로

구성된 표준 바닥구조 3을 기준으로 시공이 되고 있다. 완충재의 두께를 증가시키는 방법은 소음을 효과적으로 감소시키는 효과가 있다. 완충재는 충격파를 흡수하고 분산시키는 데 효과적이며, 이는 바닥을 통해 전달되는 소음을 줄이는 데 기여한다. 이렇듯 완충재는 소재, 형상에 따라 소음저감 연구가 진행되고 있으나, 바닥구조를 이루고 있는 나머지 구조는 소음 저감 연구가 미비한 것이 현실이다. 본 연구에서는 완충재의 소음 저감효과와 추가적으로 소음을 저감할 수 있는 방법을 연구하였고 모르타르에 3D Textile을 결합하여 기준 모델 대비 소음저감효과에 대해 연구를 수행하였다. 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저, 바닥구조에 3D Textile 소음 저감제를 세 가지 방법으로 적용하여 실험을 진행 후 성능을 분석한다. 다음으로, 소음해석을 실험과 동일한 조건으로 진행하여 해석의 신뢰성 검증을 진행한다. 그 다음, 3D Textile의 부착 위치 따른 소음저감 효과를 분석한다. 마지막으로, 이 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

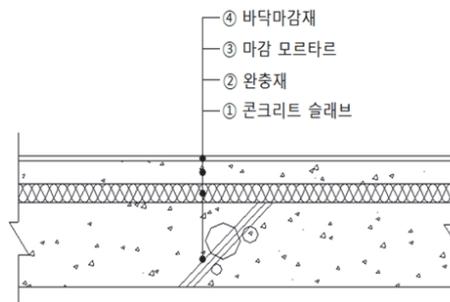


Fig. 5 Standard floor structure 3 sectional view

4. 연구 수행

본 연구의 실험은 KS F 2810-2 표준에 따른 중량충격음을 적용하여 진행하였다[4]. 소음해석은 유한요소를 통한 소음해석을 진행하였으며, 사용된

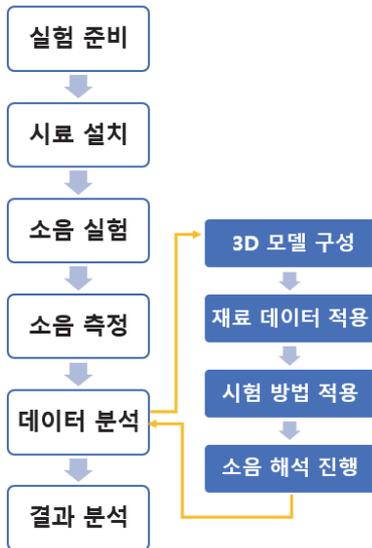


Fig. 6 Number of complaints about noise between floors

소프트웨어는 범용유한요소 프로그램인 Abaqus를 사용하였다. 연구의 프로세스는 Fig. 6과 같이 진행하였다.

4.1 소음 실험

4.1.1 시편제작

3D Textile 적용 소음 저감재의 바닥충격을 실험을 실시하기 위해 Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 3종류의 시편을 제작하였다.

3D Textile일 적용되지 않은 시편을 Reference, 하단 1면에만 적용한 시편을 1Layer, 상단과 하단 모두 적용한 시편을 2Layer라 명명하였다.

시편의 사이즈는 1700*1700*80mm이며 나무로 제작된 몰드에 3D Textile을 배치하고 그 위로 모르타르를 타설하였다. 3D Textile 내부로 모르타르가 고루 함침될 수 있도록 소량씩 타설하여 나무판자로 압력을 주었으며 진동형 다짐기로 다짐을 실시하였다. 타설 이후에는 수분의 증발을

Reference	1 Layer	2 Layer

Fig. 7 Experimental variables



Fig. 8 Final psalm shape

막기 위해 비닐을 활용하여 마감하였으며 약 20°C의 실험실 환경에서 28일간 양생을 실시하였다. 양생을 마친 시편은 Fig. 8과 같이 견인 고리를 부착하여 실험장소 까지 운반되었다.

4.1.2 소음실험 방법

소음 실험은 KS F 2810-2(바닥 충격음 차단 성능 현장 측정 방법)에 준하여 진행하였다. 실험에서 최대 음압레벨을 측정하기 위해 KS C IEC 61672-2(KS C IEC 61672-2) 규정에 맞는 사운드 레벨미터를 사용하였으며, Fig. 9와 같은 구조를 가지는 환경에서 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 충격원은 임팩트볼을 통해 진행되었다. 임팩트 볼은 1m 높이에서 자유낙하 하여 1500N 정도의 최대 충격력을 갖는다. Fig. 10은 Kim et al.(2005)의 연구를 통해 나타난 주파수 대역에 따른 충격 폭로 레벨이 변화를 뱅머신과 임팩트볼로 나뉘어 나타내고 있다[6]. 본 연구에서는 층간소음의 민원 중 가장 많은 부분을 차지하는 ‘뛰거나 걷는 소리’를 적용시키기 위해 4000N의 충격력을 가지고 있는 뱅머신 보다는 임팩트볼

을 적용하여 실험을 하였다. 소음 측정은 발걸음 주파수인 63Hz ~ 250Hz를 기준으로 실험 결과를 도출 하였다.

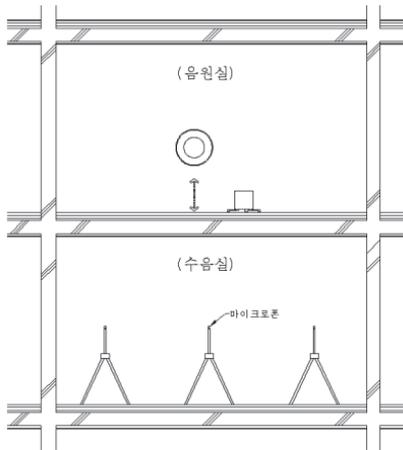


Fig. 9 Overview of floor structure and measurement for noise measurement

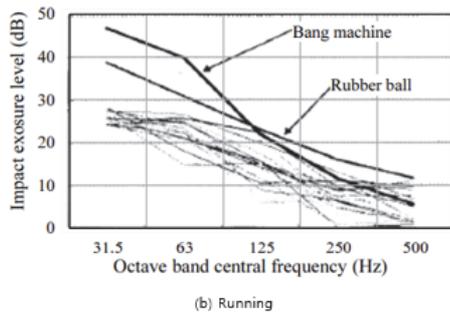
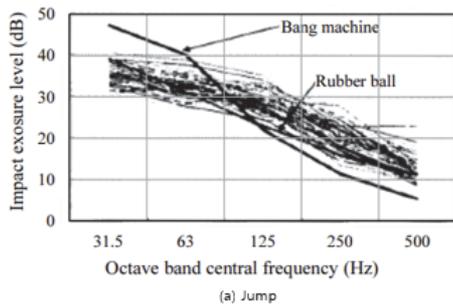


Fig. 10 Comparison of impact ball and bang machine according to actual impact force (Kim et al., 2005).

4.2 소음 실험 결과

결과 데이터는 KS F 2810-2에 의해 측정된 1/3옥타브 밴드의 측정결과를 KS F 2863-2에 명시된 식 (1)를 통해 단일수치평가량을 계산한다[6].

Table 3. Calculation function(KS F 2863-2)

$X_{iA,Fmax}$	정수 단위로 반올림한 A-가중 최대 바닥 충격음 레벨
j	50~630Hz 범위의 1/3옥타브 대역, 63~500Hz 범위의 1/1 옥타브 대역을 표시하는 첨자
$X_{iA,Fmax,j}$	1/3옥타브 대역 또는 1/1옥타브 대역의 최대 바닥충격음 레벨을 소수점 첫째 자리로 표시
A_j	1/3 옥타브 대역 또는 1/1 옥타브 대역의 A-가중 보정값 (Table 4.)

Table 4. A weighted calibration value

Hert	1/3옥타브 대역 A(dB)	1/1옥타브 대역 A(dB)
50Hz	-30.3	
63Hz	-26.2	-26.2
80Hz	-22.4	
100Hz	-19.1	
125Hz	-16.2	-16.2
160Hz	-13.2	
200Hz	-10.8	
250Hz	-8.7	-8.7
315Hz	-6.6	
400Hz	-4.8	
500Hz	-3.2	-3.2
630Hz	-1.9	

Table 5 Experimental results

	Impact Ball		
	Reference	1 Layer Model (3D Textile)	2 Layer Model (3D Textile)
L_{fmax} (dB)	51	49	49

실험 결과는 Table 5와 같이 도출되었다. 3D Textile을 적용한 중량충격음 실험을 통해 적층 위치에 따라 소음 저감 효과가 있음을 확인하였다.

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

4.3 소음 해석

소음 해석은 실험과 동일한 조건으로 진행하였으며, 소음해석을 진행하기 위해 Fig. 11과 같이 표준바닥구조 3을 3D 모델로 구성하였다. 재료 데이터는 밀도와 체적탄성계수를 적용하였다. 본 연구의 바닥구조는 구조의 대칭성으로 경계에서의 반사되는 파동을 최소화 하여 모델을 간략하게 구

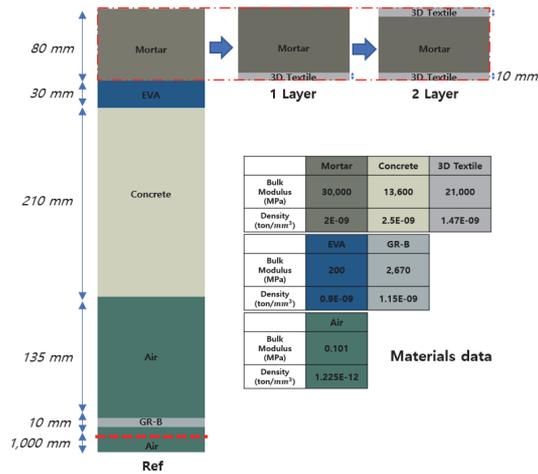


Fig. 11 Noise analysis model material data information

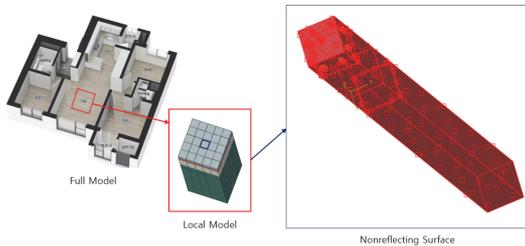


Fig. 12 Nonreflecting feature

성할 수 있는 Nonreflecting 기법을 적용할 수 있다. Fig. 12과 같이 Nonreflecting을 적용한 모델로 간략화 하여 구성하였다.

해석에 사용된 Solver는 Dynamic, Explicit를 사용하였으며, 음의 속도를 고려하여 0.1s의 해석 시간을 적용하였다. 음압은 1700N의 충격량을 적용하여 해석을 진행하였다.

유한요소는 AC3D4(Acoustic Continuum 3D, Node 4)요소를 사용하였으며, 요소의 개수는 총 7,588개와 노드 수는 1,797개로 구성되어 있다.

4.4 소음 해석 결과 및 고찰

임팩트 볼의 충격력을 적용한 소음해석을 실험과 동일하게 세 가지 종류로 해석결과를 도출하였다. 해석결과는 음압으로 도출되며, 실험에서 측정 한 마이크로폰의 위치와 동일한 좌표에서 결과를 출력하였다.

첫 번째로 3D Textile을 적용하지 않은 Reference Model은 Fig. 13와 같이 51.65데시벨이 도출되었

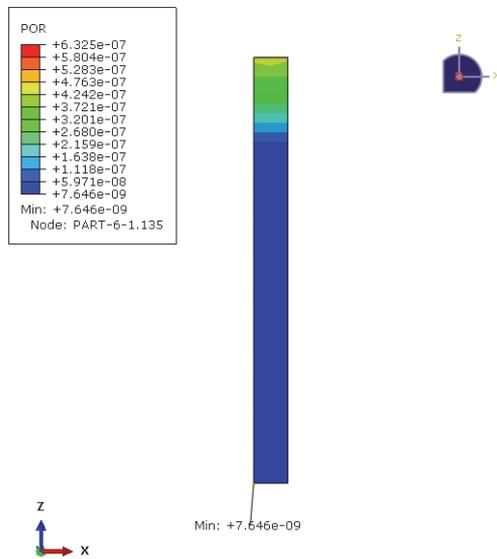


Fig. 13 Reference model

다. 두 번째 모델인 3D Textile을 1 Layer 적용한 모델은 Fig. 14와 같이 48.87데시벨이 도출되었다. 마지막으로 2 Layer를 적용한 모델은 Fig. 15과 같이 48.70데시벨이 도출되었다. 소음해석 결과를 통해 Table 6과 같이 표를 통한 모델 별

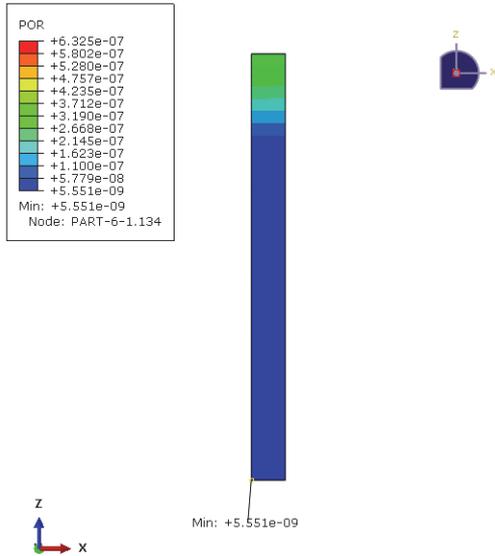


Fig. 14 1 Layer model(3D Textile)

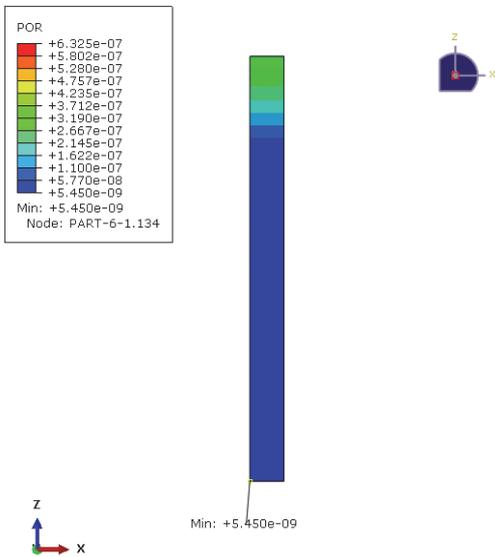


Fig. 15 2 Layer model(3D Textile)

비교를 진행하였다. 기준 모델은 대비 3D Textile을 1 Layer 적용한 모델이 2.78데시벨 감소된 것을 확인할 수 있었다.

그러나 Layer가 2배가 되었을 때 데시벨의 감소는 선형적으로 나타나지 않았으며, 소음 저감효과는 미비하였다. Fig. 16에서처럼 실험과 해석의 결과 분석을 통해 1 Layer 적용 모델이 소음저감 효과가 가장 큰 것으로 확인할 수 있다.

바닥슬래브에서 충격소음을 저감시키기 위해서는 슬래브의 두께를 키우거나 철근이나 FRP등의 재료를 슬래브에 보강하여 슬래브의 강성(Stiffness)을 키우거나 슬래브위로 완충재등을 활용하여 슬래브로 전달되는 충격의 크기를 줄이는 방법들이 주로 사용되고 있다[8,9]. 본 연구에서 사용된 3D Textile을 활용한 공법은 슬래브의 추가적인 단면 크기 상승 없이 효과적으로 충격을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났는데 이는 슬래브 내부에 존재하는 3D Textile과 모르타르간의 밀도차이에 의해 파동이 굴절 및 에너지의 상쇄에 의한 것으로 판단된다.

Table 6. Analysis result

	Impact Ball		
	Reference	1 Layer Model (3D Textile)	2 Layer Model (3D Textile)
Lfmax (dB)	51	49	49

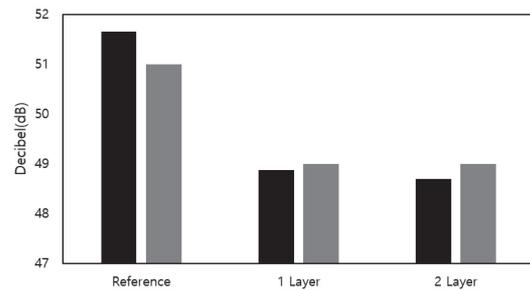


Fig. 16 Comparison of experiments and analysis

하지만, 1Layer과 2Layer 실험 결과가 큰차이를 나타내지 않은 것을 보았을 때 타격점인 슬래브의 상면에 적용하는 것은 직접적인 효과를 나타내지 않을 것으로 판단되며 최종적으로 진동이 전달되는 슬래브의 하부에서만 소음저감효과를 발휘하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 층간소음에 대한 사회적 이슈로 인해 바닥 슬래브의 완충재를 통한 소음저감 연구가 주를 이루어지고 있는 가운데 마감 모르타르에 3D Textile을 적용하여 소음저감 효과를 극대화하는 방안을 연구하였다. 다만, 3D Textile의 적층 위치와 두께에 대한 소음 저감 최적화는 고려하지 않아 추후 연구에 검토해야 할 부분이다. 본 연구를 통해 확인한 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구를 통하여 KS F 2810-2 규격에 따른 소음 저감제 성능평가를 소음해석을 통해 검토할 수 있음을 확인하였다. 3D Textile을 1 Layer 적용하였을 시 적용하지 않은 모델 대비 실험과 해석에서 각각 2dB, 2.78dB 감소 효과가 있었으며 1 Layer와 2 Layer 두 경우 모두 소음저감에 효과를 나타냈다.
- 2) 1Layer와 2Layer간의 소음저감 차이는 크게 나타나지 않았으며 이는 충격음 발생지점에서의 3D Textile의 적용은 별다른 효과를 나타내지 않는 것으로 분석된다. 효율적인 사용을 위해서는 최종적으로 진동이 전달되는 면인 슬래브 바닥면에만 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
- 3) 3D Textile의 소음저감 효과는 일정수준 확인되었지만 두께나 사용재료등 다양한 변수에 대한 추가적인 연구가 수행될 경우 공동

주택의 바닥슬래브 구조에서 더욱 효과적인 소음감소 효과를 가져올 수 있는 재료를 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 공동주택 층간소음의 관리 규정과 분쟁 양상, 통계청 통계개발원 및 주거문화개선 연구소, (2021).
- [2] 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 검사기준, 국토교통부고시 제2023-494호, (2023).
- [3] 소음방지를 위한 층간 바닥충격음 차단 구조기준, 국토교통부고시 제2015-319호, (2023).
- [4] KS F 2810-2 “건축물의 바닥충격음 차단성능 현장 측정방법”, 국가기술표준원, (2022).
- [5] KS C IEC 61672-2 “전기음향 - 사운드레벨미터(소음계) - 제2부: 형식 평가 시험”, 국가기술표준원, (2022).
- [6] Kim, Kyoung-Woo, et al. “Impact power characteristics as behavior of real impact source (child).” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering 15.5 (2005): 542-549.
- [7] KS F 2863-2 “건물 및 건물 부재의 바닥 충격음 차단성능 평가 방법-제2부: 표준 중량 충격원에 대한 차단성능”, 국가기술표준원, (2022).
- [8] 최경석(Choi Gyoung-Seok), 최현중(Choi Hyun-jung), 양관섭(Yang Kwan-Seop), and 김경우(Kim Kyoung-Woo). “바닥충격음 저감방안에 따른 성능평가.” 한국소음진동공학회 논문집 14.9 (2004): 811-818.
- [9] 이병권. “바닥충격음 저감을 위한 슬래브 보강.” 소음 진동 23.3 (2013): 22-25.

(접수: 2024.04.18. 수정: 2024.05.07. 게재확정: 2024.05.14.)