

완충재의 동특성에 따른 중량충격음 증폭에 관한 해석적 연구

The Effect of Dynamic Property of Absorbing Sheet on the Amplification of Heavy Weight Floor Impact Noise

황재승[†]·문대호^{*}·박홍근^{*}·홍성걸^{*}·홍건호^{**}

J. S. Hwang, D. H. Moon, H. G. Park, S. G. Hong and G. H. Hong

(2010년 4월 15일 접수 ; 2010년 6월 28일 심사완료)

Key Words : Floor Impact Noise(바닥충격음), Floating Floor System(뜬바닥구조), Absorbing Sheet(완충재), Heavy Weight Floor Impact Noise(중량충격음), Amplification Mechanism(증폭메커니즘), Slab System with Stud(전단연결재 바닥구조)

ABSTRACT

Previous experimental results performed by many researchers for a couple of decades in South Korea have shown that an absorbing sheet inserted in a conventional floating slab system for thermal insulation or vibration absorption may amplify the vibration of the slab system at specific frequency ranges depending on the material properties of the sheet. The amplified vibration, consequently, results in the heavy weight floor impact noise exceeding the sound level limit for an apartment house, 50 dB. In this study, the amplification mechanism is examined through numerical analysis and a new slab system is proposed to reduce the amplification and control the noise. The new slab system consists of studs connecting the base slab and upper concrete finishing yielding the dramatically increased stiffness of the slab. The numerical simulation is performed to investigate the effect of the slab system with studs on the vibration and noise control. The results show that the performance of the slab is sensitive to the number and location of studs, and the heavy weight floor impact noise can be reduced up to 6~7 dB compared to the conventional slab system at the optimal stud location.

1. 서론

국내 공동주택 바닥충격음을 저감하기 위한 연구의 주된 흐름을 보면 슬래브의 두께를 증가시키거나 뜬바닥 구조에 의해 충격하중을 완화시키려는

방향으로 전개되어 온 것을 알 수 있다^(1~3). 바닥충격음이 사회적 이슈로 등장하면서 120~150 mm이었던 벽식 구조 슬래브의 두께가 180 mm로 증가되었다가 “공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준(2005)”의 표준바닥구조에서는 210 mm 이상으로 설정되어 현재 대부분의 공동주택에 적용되고 있다. 뜬바닥구조는 바닥충격음의 저감을 위하여 바닥마감층(상부온돌구성층)을 콘크리트 슬래브로부터 탄성지지물(완충재)에 의해 격리시킨 시스템으로 바닥에 작용하는 충격하중이 지지층의 완충작용에 의해 슬래브에 전달되는 것을 차단함으로써 슬래브의 진동과 이로부터 기인하는 소음을 저감시킨다. 완충

[†] 교신저자 ; 정회원, 전남대학교 건축학부
E-mail : jshwang@jnu.ac.kr
Tel : (062)530-1641, Fax : (062)530-0250
^{*} 서울대학교 건축학과
^{**} 호서대학교 건축공학과

이 논문 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

재의 동탄성계수(스프링상수)가 작고 적정한 손실계수를 보유해야 충격하중 차단효과를 가지기 때문에 기준에서는 측면 완충재의 동탄성계수는 150 MN/m³ 이하, 콘크리트 슬래브 완충재의 동탄성계수는 40 MN/m³ 이하이며 손실계수 0.1~0.3 범위의 값을 갖도록 규정하고 있다.

새로운 소재와 다양한 형상을 가지며 품질기준과 단열성능을 만족하는 다수의 완충재가 개발되어 바닥판의 진동 및 소음저감에 활용되고 있다. 그러나 이들 대부분의 완충재는 고주파영역에서 발생하는 경량충격음의 저감에는 매우 효과적인 것으로 나타나고 있으나 저주파영역에서 발생하는 중량충격음에 대해서는 저감효율이 미미한 것으로 알려져 있으며, 그간 많은 실험연구와 현장적용과정에서 완충재 설치 후의 중량충격음이 맨바닥에서의 중량충격음에 비해 오히려 증폭되는 현상이 나타나 차단기준 50 dB을 초과하는 경우가 있는 것으로 보고되고 있다.

이러한 증폭현상이 완충재의 동적특성, 마감층 및 콘크리트 슬래브의 거동특성과 관련된 상호작용에 의하여 나타나는 현상으로 이해되고 있지만 아직 이에 대한 명확한 발생 원인과 그에 대한 해결방안이 제시된 게 없는 실정이다.

이 연구에서는 완충재의 동적 특성이 중량충격음의 증폭에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 분석함으로써 완충재에 의한 증폭메커니즘을 파악하고 중량 충격음의 증폭을 저감하기 위해 저자들에 의해 개발된 소음저감 시스템의 성능을 평가하고 최적의 소음저감을 구현하기 위한 시스템의 설계방법을 제안하고자 한다.

완충재에 의한 증폭 및 저감시스템의 효과를 보다 면밀하게 검토하기 위해서는 해석모델이 공동주택의 평면배치, 면적, 벽체위치를 고려한 경계조건을 모사하고 그로부터 소음해석을 수행해야한다. 그러나 이 연구의 목적이 증폭메커니즘과 제안한 시스템의 저감메커니즘을 고찰하는 것에 초점을 두었고 해석의 단순성과 효율성을 위해서 대상구조물을 단순평판에 적용한 것이다. 보다 현실적 문제를 고려하기 위해 다양한 변수(슬래브의 면적, 지지방법 등)에 의한 영향은 이 기초연구를 바탕으로 향후 더욱 정밀한 해석을 통해서 고찰할 예정이며 현장 실험과 연계하여 그 효과를 지속적으로 검증해 나가

고자 한다.

2. 중량충격음 증폭메커니즘

2.1 해석모형

공동주택 바닥구조는 콘크리트 슬래브 상부면에 완충재를 설치하고 그 위에 바닥 마감층(경량 콘크리트와 마감 모르타)이 순차적으로 적층되는 구조이다. 콘크리트 슬래브와 바닥 마감층은 강성이 상대적으로 작은 완충재에 의해 독립적으로 거동한다고 가정할 수 있다. 완충재의 동탄성계수와 손실계수는 스프링과 대쉬포트로 단순하게 모델링을 할 수 있으며 콘크리트 슬래브와 바닥 마감층을 연결하게 된다. 마감층 하중에 의해 완충재가 초기 변형을 일으키며 슬래브와 마감층의 상대변위는 완충재의 초기 변형보다 작다는 가정에 의하여 이들 세 개의 면재가 분리되지 않고 연결된 상태가 유지된다고 가정한다. 이러한 해석모형을 표현한 것이 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 u , v 는 각각 슬래브와 마감층의 z 방향으로의 변위를 나타내며 k_v , c_v 는 완충재의 스프링계수와 감쇠계수를 나타내는 것이다.

식 (1)은 완충재가 연결되기 전 슬래브와 마감층의 수직방향 변위를 모드공간에서 나타낸 것이다.

$$u(x, y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k(t) p_k(x, y) \quad (1a)$$

$$v(x, y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k(t) q_k(x, y) \quad (1b)$$

여기서, $a(t)$, $b(t)$ 는 모드공간에서의 일반화 변위를 나타내며, $p(x, y)$, $q(x, y)$ 는 슬래브와 마감층 (x, y) 지점에서의 모드형상을 나타낸다. 모드 형상은 지지조건에 따라 각기 다른 형태를 가지며, 모드형상은 슬래브 질량에 대하여 '1'로 정규화 되었다고

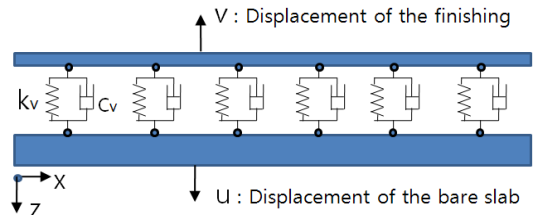


Fig. 1 Schematic model of the slab system

가정한다.

독립된 슬래브와 마감층이 단위면적당 강성 k_v 와 감쇠 c_v 를 가지는 완충재에 의해서 서로 연결된다고 가정하면, 완충재 소재 내에 축적되는 위치에너지 V_v 와 감쇠에너지 D_v 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 완충재에 의한 슬래브와 마감층의 사이의 이격거리는 슬래브 전체 높이에 비하여 작고, 소재의 밀도 또한 콘크리트의 밀도에 보다 작기 때문에 완충재의 질량은 슬래브 총 질량에 비하여 무시할 정도로 작다. 이러한 가정에 의해서 점탄성소재의 운동에너지는 무시하기로 한다.

$$V_v = \frac{1}{2} k_v \int [u(x,y,t) - v(x,y,t)]^2 dx dy \quad (2a)$$

$$D_v = \frac{1}{2} c_v \int [\dot{u}(x,y,t) - \dot{v}(x,y,t)]^2 dx dy \quad (2b)$$

위 식은 완충재가 연결되는 지점 (x,y) 에서의 소재내부에 축적되는 전체에너지를 나타낸다.

완충재와 별도로 슬래브와 마감층이 가지는 운동에너지(T_s)와 위치에너지(V_s)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 수식전개의 편의를 위하여 바닥판의 감쇠는 고려하지 않았다.

$$T_s = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{a}_k^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} \dot{b}_k^2 \quad (3a)$$

$$V_s = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} w_{ak}^2 a_k^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} w_{bk}^2 b_k^2 \quad (3b)$$

여기서, w_{ak} , w_{bk} 는 각각 슬래브와 마감층의 k 번째 고유 각속도(angular velocity)를 나타낸다. 식 (1)을 식 (2)에 대입한 후 전체 바닥구조 시스템(슬래브, 마감층과 완충재)의 운동에너지(T), 위치에너지(V), 감쇠에너지(D)를 구한 후 Lagrangian(L)을 구성하여 운동방정식을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{z} + \text{diag}(2\xi_{ak} w_{ak}, 2\xi_{bk} w_{bk}) \dot{z} + \text{diag}(w_{ak}^2, w_{bk}^2) z + k_v \int \Phi^T \Phi dx dy z + c_v \int \Phi^T \Phi dx dy \dot{z} = E f \quad (4)$$

식 (4)에서 $\text{diag}(\cdot)$ 는 대각화 기호로써 슬래브와 마감층 각 모드의 감쇠비, 고유진동수를 대각화하는 것이며 외부하중 f 는 마감층에 작용하는 충격하중,

E 는 모드공간에서 하중의 위치를 나타내는 행렬이며, 그 외 각각의 변수들은 다음과 같다. 여기서 슬래브의 모드 개수는 n 개, 마감층의 모드개수는 m 개로 제한하여 나타내었다.

$$z = [a_1 \cdots a_n, b_1 \cdots b_m]^T \quad (5)$$

$$\Phi = [p_1(x,y) \cdots, p_n(x,y), q_1(x,y), \cdots q_m(x,y)]^T \quad (6)$$

$$E = [0, \cdots 0, q_1(X_f, Y_f) \cdots q_m(X_f, Y_f)]^T \quad (7)$$

여기서 (X_f, Y_f) 는 충격하중이 가해지는 지점의 좌표를 나타낸다. 이때 슬래브에 해당하는 모드의 값이 모두 '0'인 이유는 충격하중이 마감층에 작용하기 때문에 직접적으로 슬래브에 작용되는 않는다는 것을 나타내기 위한 것이다.

모드공간에서의 응답 식 (4)를 이용하여 완충재가 설치된 바닥구조 시스템의 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(x,y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k(t) p_k(x,y) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k(t) q_k(x,y) \quad (8)$$

식 (8)은 독립적으로 거동하는 슬래브와 마감층의 응답이 식 (1)이 완충재에 의해서 연결되었을 때 식 (4)의 영향이 반영된 것이다.

식 (8)의 응답 중에서 슬래브의 변위만을 나타내는 변수를 별도로 분리하고 그때의 속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(r_s) = [\dot{a}_1, \dot{a}_2, \cdots, \dot{a}_n]^T \quad (9)$$

식 (9)와 같은 슬래브의 속도를 이용하여 소음해석을 수행할 수 있을 때, 이때 바닥판 하부의 음압은 다음과 같이 진동수 영역에서 나타낼 수 있다^(4,5).

$$P(r) = -\frac{ik\rho c}{4\pi} \int G(r|r_s) V(r_s) ds(r_s) \quad (10)$$

여기서 i 는 단위 복소수, r 은 음압을 알고자하는 공간 내 임의의 점을 나타내는 변위벡터, k , ρ , c 는 각각 wavenumber, 공기밀도, 음속을 나타내며 r_s 는 바닥판 내 임의의 점을 나타내는 변위벡터, $G(r|r_s)$ 는 바닥판내의 진동이 공간내 임의지점 r 의 음압에

미치는 영향을 나타내는 Green 함수를 나타낸다.

2.2 완충재의 동적특성에 따른 증폭

완충재의 동적 특성에 따른 중량 충격음의 증폭 현상을 수치해석을 통하여 검토하였다. 수치해석에 사용된 슬래브와 마감층의 사양은 Table 1과 같다. 직사각형 형상을 가지는 단순 평판이며 슬래브의 두께 150 mm으로 하였으며 마감층의 두께는 경량 기포 콘크리트와 마감 모르터를 포함하여 80 mm이나 슬래브보다 강도가 작고 미세 균열에 의해 강성이 작아지는 효과를 반영하기 위하여 50 mm로 유효두께를 사용하였다.

모드 해석^(6,7)을 통하여 슬래브와 마감층 각각의 고유진동수와 완충재의 동탄성 계수가 2 MN/m³인 경우의 고유진동수를 비교한 것이 Table 2에 나타나 있다. 슬래브는 4번 힌지로 지지되어있고 마감층은 4번 자유단이므로 고유진동수가 '0'인 4개의 병진

모드를 가진다. 완충재에 의해 바닥판의 고유진동수가 전체적으로 작아지는 것을 알 수 있다.

완충재의 동탄성계수에 따른 바닥시스템의 진동수변화가 Fig. 2에 나타나 있다. 그림에서 원형 모양이 동탄성 계수값에 따른 시스템 전체의 고유진동수를 나타낸다. 동탄성계수의 값이 증가하면서 전체적으로 고유진동수가 커지는 것을 알 수 있고 작은 동탄성계수에서 40 Hz 이하의 고유진동이 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 이것은 동탄성계수 증가에 따라 고주파 영역의 고유진동수가 증가하고 해당모드 진동에서 배출되는 소음 또한 증가하여 중량충격음에 불리한 것을 나타낸다.

다음은 동탄성계수값에 따른 소음해석결과를 나타낸다. Figs. 3, 4는 각각 동탄성 계수가 10, 100 MN/m³일 때의 1/1 옥타의 밴드에서의 소음해석결과를 나타내는 것으로 나슬래브 상태의 소음보다 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 그림에서 직사각형 마커는 나슬래브, 원형 마커는 완충재 설치 시 소음이다.

동탄성 계수가 10인 경우에는 50~100 Hz 사이에서 증폭이 발생하고 있으며 동탄성계수가 100 MN/m³인 경우에는 100~250 Hz 사이에서 증폭되어 소음이 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그에 비하여 동탄성 계수가 2 MN/m³로 아주 작은 경우에는 완충재의 충격하중 격리 효과에 의하여 나슬래브 상태의 소음보다 모든 주파수 영역에서 줄어드는 것을 알 수 있다(Fig. 5).

이와 같이 완충재의 동탄성 계수 값에 의해 중량 충격음의 증폭이 발생하고 있으며 크기에 따라 증폭되는 주파수영역이 달라지는 것을 알 수 있다. 완충재의

Table 1 Specification of the slab system

Type	Property	Value
Bare slab	Size	4.5 × 3.9 m
	Thickness	150 mm
	Density	2400 kg/m ³
	Boundary condition	4 sides hinge
Finishing	Size	4.5 × 3.9 m
	Thickness	80 mm
	Density	2100 kg/m ³
	Boundary condition	4 sides free ends
Absorbing sheet	Dynamic modulus	2 ~ 100 MN/m ³
	Loss factor	0.1~0.3

Table 2 Natural frequency of the slab system

	Bare slab	Finishing	Slab system
Natural frequency (Hz)	27.1	0	19.4
	62.0	0	21.8
	73.6	0	21.8
	108.5	0	21.9
	120.2	9.4	23.6
	151.0	9.4	23.9
	166.7	12.5	24.9
	185.9	12.5	25.2
	201.7	21.9	30.5
	244.2	25.9	32.3

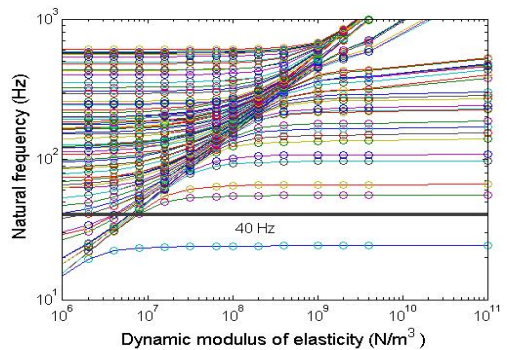


Fig. 2 Distribution of the natural frequencies

증폭효과는 동탄성계수뿐만 아니라 손실계수의 영향도 고려해야하는데 수치해석결과 손실계수의 영향은 매우 작은 것으로 나타나 이 연구에서는 그에 대한 영향을 생략하였다.

3. 증폭 저감 시스템

3.1 전단연결재에 의한 증폭저감

수치해석결과에 의하면 완충재의 동탄성계수에 따라 증폭되는 양상이 다른 것을 알 수 있다. 작은 동탄성계수는 저주파영역의 소음을 증폭시키며 그에 비하여 큰 동탄성계수는 고주파 영역에서의 소음을 증폭시키는 것으로 나타났다. 이것은 완충재에 의해 슬래브 시스템의 동적특성이 변화되고 그에 따라 슬래브의 주 에너지 성분이 변화된 주파수대역으로 이동하기 때문이다.

이러한 증폭을 저감하기 위하여 전단연결재를 이용하여 슬래브와 마감층을 적절히 구속하는 새로운 시스템을 개발하였다. 전단 연결재가 완충재를 관통하여 슬래브와 마감층을 구속하는 형상이 Fig. 6에 나타나 있다. 전단연결재의 일부는 콘크리트 슬래브에 고정되고 완충재를 관통하여 마감층 콘크리트와 접합되어 강한 구속력에 의해 완충재의 증폭을 저감하는 것이다.

전단연결재의 강성을 k_s 라 했을 때 이들이 가지 는 위치에너지 V_{st} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{st} = \frac{1}{2} k_s \oint [u(X, Y, t) - v(X, Y, t)]^2 ds(X, Y) \quad (11)$$

이것은 전단연결재에 의해서 슬래브와 마감층이 연결되는 지점(또는 경로) (X, Y) 에서의 선적분을 나타내는 것으로 연결지점의 경로에 따라 위치에너지가 달라진다. 완충재에 의해 슬래브와 마감층이 연결되었을 때의 운동방정식을 유도한 것과 같은 과정을 통하여 전단연결재가 첨가된 바닥시스템의 운동방정식을 구할 수 있으며 그 결과를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

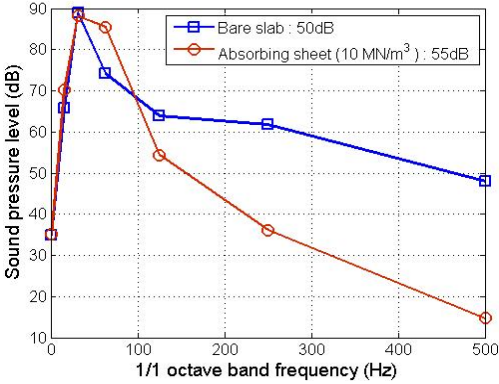


Fig. 3 Sound pressure level(10 MN/m³)

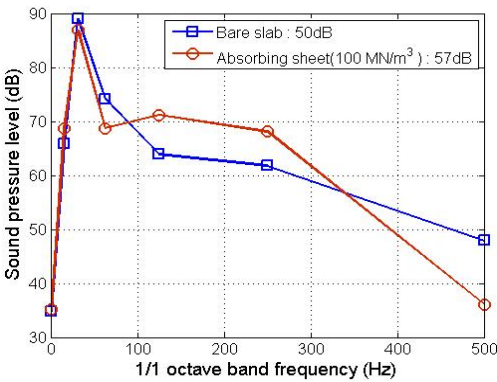


Fig. 4 Sound pressure level(100 MN/m³)

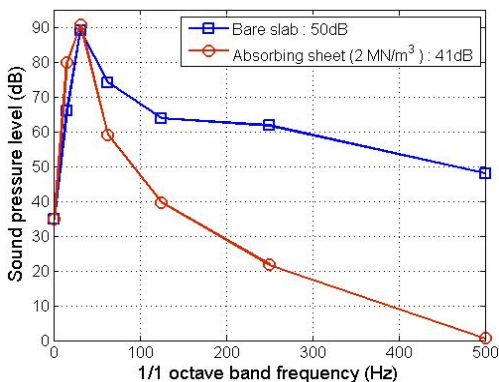


Fig. 5 Sound pressure level(2 MN/m³)

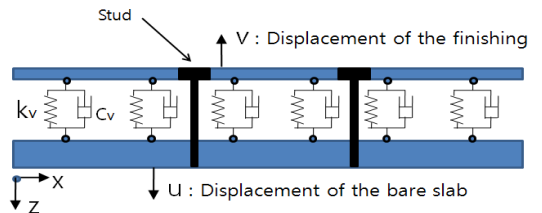


Fig. 6 Schematic model of slab system with stud

$$\ddot{z} + \text{diag}(2\xi_{ak} w_{ak}, 2\xi_{bk} w_{bk}) \dot{z} + \text{diag}(w_{ak}^2, w_{bk}^2) z + k_v \int \Phi^T \Phi dx dy z + c_v \int \Phi^T \Phi dx dy \dot{z} + k_s \int \Phi_s^T \Phi_s ds(X, Y) z = E f \quad (12)$$

식(12)의 운동방정식을 보면 완충재가 연결된 운동방정식과 유사하나 전단연결재의 강성을 나타내는 항이 추가된 것을 알 수 있다. 여기서 전단연결재와 관련된 변수는 다음과 같다.

$$\Phi_s = [p_1(X, Y) \dots, p_n(X, Y), -q_1(X, Y), \dots, q_m(X, Y)]^T \quad (13)$$

식(12)를 해석하여 슬래브에 해당하는 변위와 속도를 별도로 추출하고 식(10)에 의해 전단연결재가 설치된 슬래브 시스템의 소음해석을 수행할 수 있다.

3.2 전단연결재 위치에 따른 증폭저감 효과

전단연결재의 강성은 완충재의 강성에 비하여 매우 크기 때문에 식(12)에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브 시스템 전체의 강성을 증가시키는 역할을 한다. 전단연결재에 의한 바닥 시스템 전체의 강성 증가는 연결재의 재질 및 형상에 따른 강성과 설치 개수 및 위치에 따라 달라진다. 이 연구에서 전단연결재의 길이는 30 mm 직경 10 mm이며 재질은 강재이고 100 mm 간격으로 설치한다고 가정하였다.

전단연결재의 위치에 따른 중략충격음의 증폭저감효과를 고찰하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 대상 구조물은 앞의 예제와 동일하며 연결재의

위치를 변경하면서 최적의 증폭저감효과를 가지는 위치를 추정하였다. 완충재의 동탄성 계수는 60 Hz 대역에서 증폭을 발생 시키는 10 MN/m³을 대상으로 해석을 수행하였다.

다음은 전단연결재를 슬래브 전체에 고르게 분포

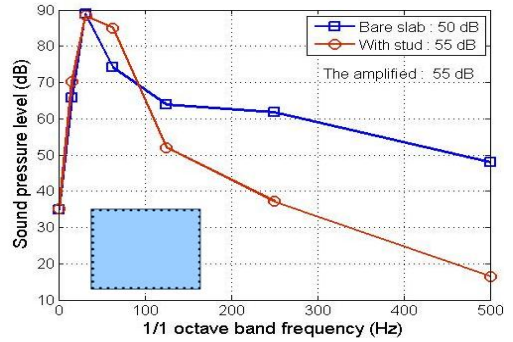


Fig. 8 Sound pressure level of the slab system with studs distributed on the sides

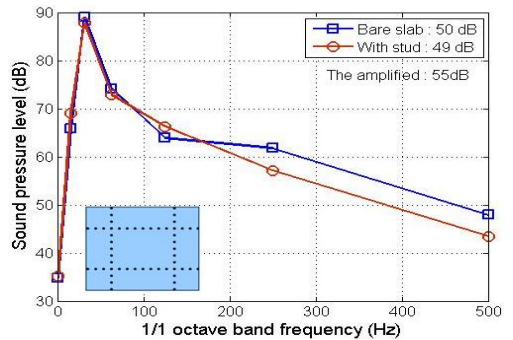


Fig. 9 Sound pressure level of the slab system with a # shape stud distribution

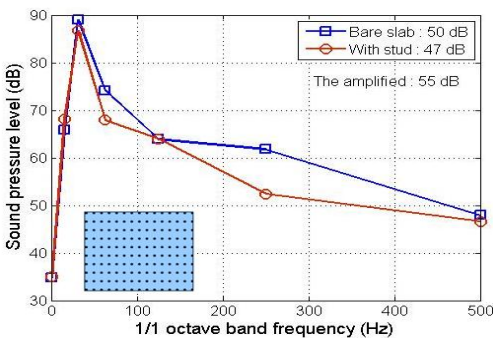


Fig. 7 Sound pressure level of the slab system with a densely distributed stud

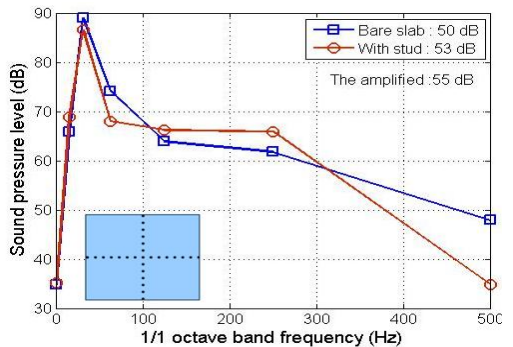


Fig. 10 Sound pressure level of the slab system with a cross shape stud distribution

하여 연결했을 때의 소음해석결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림 안쪽의 사각형은 전단연결재의 분포를 나타낸다. 슬래브 시스템의 강성이 커지고 완충재에 의한 증폭효과가 없어지기 때문에 나 슬래브의 경우보다 3 dB 저감된 47 dB을 나타내고 있다. 이것은 완충재에 의해 증폭된 경우의 소음레벨인 55 dB에 비하여 8 dB이 저감된 것을 나타낸다.

전단연결재를 슬래브 전체에 설치하는 것은 시공성과 경제적인 측면에서 불리하고 완충재의 설치 및 기타 배선에 많은 영향을 미치기 때문에 가능한 한 적은 수의 연결재를 쓸 필요가 있다. 다음은 연결재의 수를 제한하고 설치 위치를 변경했을 때 증폭저감효과와 소음저감효과를 수치적으로 해석한 결과를 나타낸다.

전단 연결재를 슬래브의 테두리 부분에 연결했을 때의 소음해석 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 음압분포를 보면 전단연결재에 의한 증폭저감효과가 없는 것을 알 수 있다.

전단연결재의 위치를 슬래브 중심으로 이동시키면서 그에 따른 증폭저감효과를 분석하였다. 다음 Fig. 9는 전단연결재가 슬래브의 1/4 지점에 위치했을 때의 소음해석결과를 나타내는 것으로 증폭된 경우보다 6 dB, 맨바닥에 비해 1 dB 소음레벨이 줄어든 것을 볼 수 있다. 전단연결재의 위치를 슬래브의 중심부분으로 이동했을 때의 결과가 Fig. 10에 나타나 있는데 이 경우에는 소음이 다시 증폭되고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 완충재의 동탄성계수에 따른 중량 충격음의 증폭효과를 고찰하고 증폭효과를 저감시키기 위해 개발된 전단연결재의 성능을 수치해석을 통하여 평가하였다.

(1) 완충재의 동탄성계수에 따라 슬래브 시스템의 고유진동수에 변화가 발생하며, 변화된 진동 모드에 진동에너지가 재분배되면서 증폭되는 주파수 영역이 달라지는 것을 알 수 있다.

(2) 전단연결재는 슬래브와 마감층을 연결함으로써 슬래브 시스템 전체 강성을 증가시키는 효과를 가지며 완충재의 증폭효과를 저감하는 것으로 나타났으나 연결재의 설치개수 및 설치 위치에 따라 증폭

저감효과가 달라지기 때문에 슬래브 설계과정에서 전단연결재의 최적위치를 선정할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단)

참 고 문 헌

- (1) Hong, G.-H., Park, H.-G., Hwang, J.-S., 2007, An Experimental Study on the Performance of Heavy_Weight Floor Impact Noise of Hollow Core Slab, Proceedings of AIK, Vol. 27, No.1 pp. 901~904.
- (2) Seo, S. H., Song, H. S., Jeon, J. Y., 2004, "Noise and Vibration Characteristics of Concrete Floor Structures Using Resilient Materials Driven by Standard Heavy Impact Source," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 661~667.
- (3) Kim, H.-G., Kim, M.-J., Lee, B.-K., 2005, "Study on Measuring the Dynamic Stiffness of Materials Used under Floating Floors in Dwellings," Transactions of the AIK, Vol. 21., No. 1, pp. 229~234.
- (4) Junger, M. C. Feit, D., 1994, Sound, Structures, and Their Interaction, 2nd Edition, MIT Press.
- (5) Sung, C.-C. and Jan, J. T., 1997, "The Response of and Sound Power Radiated by a Clamped Rectangular Plate," Journal of Sound and Vibration, Vol. 207, No. 3, pp. 301~317.
- (6) Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis (Mechanical Engineering Research Studies, Engineering Control Series, 9), John Wiley & Sons.
- (7) Moheimani, S. O. R., Halim, D., Fleming, A. J., 2003, Spatial Control of Vibration : Theory and Experiments, World Scientific.