

점탄성재료가 결합된 PC슬래브의 바닥충격음 제어에 관한 수치해석 연구

Numerical study on impact noise control of PC slab coupled with viscoelastic material

황재승†·홍건호*·박홍근**

Jae-seung Hwang, Gun-ho Hong and Hong-geun Park

Key Words : PC slab(PC 슬래브), 점탄성소재(Viscoelastic material), 진동 소음저감(Vibration and noise control), 부분구조합성법(Substructuring), 수치해석(Numerical analysis)

ABSTRACT

In this study, a new slab system that adjoins precast slabs are connected each other by viscoelastic material is proposed and numerical analysis is performed to evaluate the effect of the slab system on the vibration and noise control. Substructuring is introduced to develop the equation of motion of the slab system and the optimal properties of viscoelastic material are calculated. For the performance evaluation of the new slab system, the sound power and acceleration of the slab are compared with those of two way slab and the slab which the viscoelastic material is not connected. Numerical results show that the sound power of the new slab system can be reduced an amount of 6dB.

1. 서론

모듈화 공정, 공기단축을 위하여 PC 슬래브의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 그 응용범위 또한 사무소, 공장, 군용수용시설에서부터 공동주택과 같은 주거공간에 이르고 있으며 더욱 다양한 구조물에 적극적으로 사용하고 자하는 시도가 계속되고 있다.

PC 슬래브를 더욱 효과적으로 적용하기 위해서는 구조적 안정성과 더불어 진동 및 배출소음에 대해 일정수준 이상의 사용성능이 보장되어야 한다.

국내에서는 바닥충격음 법적기준으로 중량 50dB, 경량 58 dB 이하의 값이 되도록 고시된바 있다. 이에 대한 대안으로 두께 210mm의 표준바닥 구조가 권장되고 있으며 이 외에도 소음성능을 개선하기 위한 새로운 바닥구조시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이들 연구 동향을 보면 대부분 두께가 증가된 슬래브와 뜬바닥에 의한 바닥충격음 개선 방안이 주된 흐름으로, 슬래브와 뜬바닥 사이의 “완충재”에

의해 중량 바닥충격음 문제가 개선 가능할 것이라는 관점에서 비롯된 것이다. 따라서 설계 단계에서 슬래브의 진동이나 배출소음의 예측에 의한 “해석적 방법”보다는, 일단 두 겹께 슬래브를 만들고 나서 불특정한 다수의 완충재를 적용해 보는 “실험적 방법”으로 연구가 진행되어왔다.

바닥충격음은 슬래브의 미소진동에 의한 인접공기의 압력 변화에서 비롯된다. 이중 경량충격음은 상대적으로 고주파영역에서 발생하기 때문에 품질기준을 만족하는 완충재에 의해 효과적으로 저감된다. 그러나 중량충격음은 저주파영역의 굽힘파에 의해 지배적인 영향을 받기 때문에 기존의 완충재만으로 저감효과를 기대하기 어렵다. 따라서 슬래브 구조시스템을 구조적인 방법을 통하여 혁신적으로 변경함으로써 바닥판의 진동과 이로부터 배출되는 소음을 획기적으로 저감시킬 필요가 있다.

PC 슬래브는 구조시스템을 근본적으로 변경하여 진동과 소음을 저감시킬 수 있는 대안 중의 하나이다. 그 이유는 PC 슬래브가 가지는 일방향 거동과 그에 비롯된 진동특성에서 기인한다. 기존 일체형 슬래브는 이방향 진동특성을 가지기 때문에 중량충격음에 영향을 미치는 50-150Hz사이의 고차모드가 많이 나타나는 반면, PC 슬래브와 같은 일방향 슬래브의 경우 상대적으로 고차모드의 분포가 작게 나타나며 이웃하는 PC슬래브와의 접합방식에 따라 전파되는 진동이 차단되어 횡방향으로 전달되는 진동의 크기가 작아지는 특성이 있기 때문이다.

† 전남대학교 건축학부 교수
E-mail : jshwang@jnu.ac.kr
Tel: (062)530-1641, Fax: (062)530-0250

* 호서대학교 건축공학과 교수

** 서울대학교 건축학과 교수

본 연구에서는 PC 슬래브의 진동과 배출소음의 특성을 PC 슬래브사이의 접합형식, 특히 점탄성소재를 사용하여 접합을 한 경우에 진동과 소음의 저감효과를 수치적으로 분석하고자 한다.

이를 위하여 점탄성소재에 의해 접합된 PC 슬래브의 동적거동을 파악하기 위한 수학적 모형을 유도하였으며 소음저감효과를 극대화하기 위한 점탄성 소재의 최적 파라미터를 고찰하였다. 본 연구에서 제안된 새로운 슬래브 시스템의 진동 및 소음저감효과를 검증하기 위하여 4번 단순지지된 슬래브에 대한 수치해석을 수행하여 그 성능을 비교하였다.

2. 점탄성소재가 결합된 PC슬래브의 해석모형

2.1 부분구조합성법에 의한 해석모형

PC 슬래브시스템은 수개의 일방향 PC 슬래브로 구성되며 이웃하는 슬래브를 다양한 접합방식을 통하여 독립적으로 거동하는 것을 방지한다. 마감층 자체가 접합방식으로 사용될 수도 있으며, 볼트에 의한 힌지접합 또한 대안으로 사용될 수 있다. 본 절에서는 PC 슬래브사이를 점탄성소재로 접합했을 때 슬래브의 거동을 지배하는 운동방정식을 부분구조합성법을 이용하여 유도하고 점탄성 소재가 가지는 감쇠효과에 의해 바닥판의 진동과 소음의 저감효과를 고찰한다.

부분구조합성법은 독립된 PC슬래브 각각이 가지는 운동방정식이 점탄성소재에 의해 결합되었을 때의 전체 시스템 거동뿐만 아니라 시스템을 구성하는 각 구성요소의 특성 또한 분석이 용이하기 때문에 본 연구에서 채택한 수학적 모델링 기법이다.

점탄성 소재에 의해 접합된 PC 슬래브의 형상이 그림 1에 나타나 있다. $w_i(x,y)$ 는 각 PC 슬래브의 수직변위를 나타내며 슬래브 사이를 점탄성 소재로 연결한 것이다.

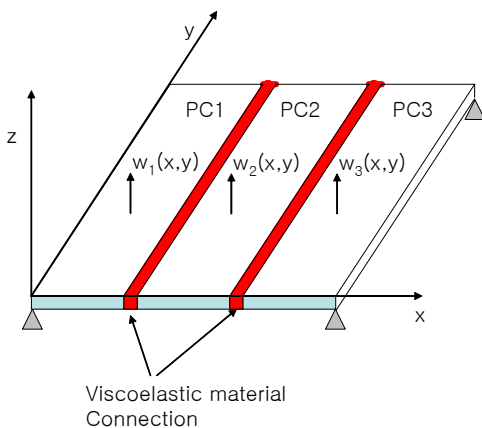


그림 1. 점탄성소재가 연결된 PC 슬래브의 형상

점탄성소재가 연결되기 전 이웃하는 PC 슬래브의 수직변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이것은 이웃하는 i -번째, j -번째 PC 슬래브의 변위를 일반적으로 나타낸 것이다.

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

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

여기서, $a(t)$, $b(t)$ 는 모달공간에서의 일반화 변위를 나타내며, $p(x,y)$, $q(x,y)$ 는 x,y 지점에서의 모드형상을 나타낸다. 이때 모드형상은 슬래브 질량에 대하여 '1'로 정규화 되었다고 가정한다.

독립된 PC 슬래브가 단위 길이당 강성 k_v 와 감쇠 c_v 를 가지는 점탄성소재에 의해서 서로 연결된다고 가정하면, 점탄성 소재 내에 축적되는 위치에너지 V_v 와 감쇠에너지 D_v 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 점탄성소재의 질량은 무시하기로 한다. 이러한 가정에 의해서 점탄성소재의 운동에너지 또한 무시한다.

$$V_v = \frac{1}{2} k_v \oint [w_i(X, Y, t) - w_j(X, Y, t)]^2 ds(X, Y)$$

$$D_v = \frac{1}{2} c_v \oint [\dot{w}_i(X, Y, t) - \dot{w}_j(X, Y, t)]^2 ds(X, Y) \quad (2,a,b)$$

위 식은 점탄성소재가 연결되는 지점(X,Y)에서의 선적분을 나타내는 것으로 연결지점 X, Y좌표에 따라 달라진다. 그림 1과 같이 X값이 특정지점으로 지정되면 식(2)는 변수 Y만을 가지게 된다.

점탄성소재와 별도로 PC 슬래브가 가지는 운동에너지(T_s)와 위치에너지(V_s)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 수직전개의 편의를 위하여 바닥판의 자체의 감쇠는 고려하지 않았다.

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

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

여기서, w_{ak} , w_{bk} 는 각 이웃하는 슬래브의 k 번째 고유각속도(angular velocity)를 나타낸다. 식(1)을 식(2)에 대입한 후 전체 시스템(PC 슬래브와 점탄성소재)의 운동에너지

지(T), 위치에너지 (V), 감쇠에너지(D)를 구한 후 Lagrangian (L)을 구성하여 운동방정식을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식(4)에서 외부하중 f는 건설교통부 바닥충격음기준에서 정하는 하중이며 그 외 각각의 변수들은 다음과 같다. 다만 모드의 개수를 n개로 제한(max k =n)하여 나타내었다.

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

$$\Phi = [\oint p_1(X, Y)ds \cdots \oint p_n(X, Y)ds, \\ - \oint q_1(X, Y)ds \cdots - \oint q_n(X, Y)ds] \quad (6)$$

$$E = [p_1(X_f, Y_f) \cdots p_n(X_f, Y_f), \\ q_1(X_f, Y_f) \cdots q_n(X_f, Y_f)]^T \quad (7)$$

여기서 (X_f, Y_f) 는 충격하중이 가해지는 지점의 좌표이다. 식(4)에서 $\text{diag}(\cdot)$ 는 대각화기호이다. 식(4)는 모드공간에서의 응답을 나타내는 것이므로 이를 실제 바닥판에서의 응답으로 나타낼 필요가 있다 실제 공간에서의 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)이 식(1)과 다른 점은 모드응답이 식(4)에 의해서 변경되었으며 그 영향에 의해서 식(1)과 전혀 다른 응답을 나타내기 때문이다.

2.2 바닥판의 소음해석모델

소음의 크기는 음파위(sound power)로 평가하였다. 음파위는 음원인 바닥판의 진동이 만들어내는 음압과 음속의 곱으로 표현되며 예측지점과 관계없이 동일한 값을 가진다.

본 연구에서 사용한 음파위는 건설교통부 기준에서 정하는 5곳의 표준 위치에서 가진하여 구한 값을 평균한 것이

다.

소음해석에 사용된 음압은 다음과 같이 진동수 영역에서 나타낼 수 있다.

$$P(r) = -\frac{ik\rho c}{4\pi} \int G(r|r_s) V(r_s) ds(r_s) \quad (9)$$

여기서 i는 단위 복소수, r은 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 임의공간지점 r의 음압에 미치는 영향을 나타내는 Green 함수, V는 바닥판의 진동속도(속도장)를 나타낸다. 음의 파워(acoustic power)는 음 압력과 그 지점의 속도의 곱으로 나타내며 음이 투과되는 공간 내 임의의 평면(S)에서의 값은 다음과 같다.

$$\Pi_{av} = \frac{1}{2} \int P(r) \cdot V(r) ds(r) \quad (10)$$

식(9)을 식(10)에 대입하고 정리하면 음의 파워는 다음과 같다.

$$\Pi_{ab} = -\frac{iw\rho}{8\pi} \iint_{s_s} V^*(r) G(r|r_s) V(r_s) ds(r) ds(r_s) \quad (11)$$

여기서 함수 $G(r|r_s)$ 를 Rayleigh 적분값을 사용하고, 바닥판내의 속도장 $V(r_s)$ 와 임의 공간 내 가상으로 결정된 평면의 속도장 $V(r)$ 가 서로 같다고 가정한다. 이때 속도장은 2.1 절의 식(4)에 의한 바닥판의 진동해석으로부터 구한다.

3. 수치해석에 의한 진동 및 소음저감효과 검증

3.1 PC 슬래브와 점탄성소재의 특성

PC 슬래브와 점탄성소재가 결합된 구조물의 진동과 소음 배출특성을 고찰하기 위한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 바닥판의 형상, 가진 및 예측지점이 그림 2에 나타나 있다.

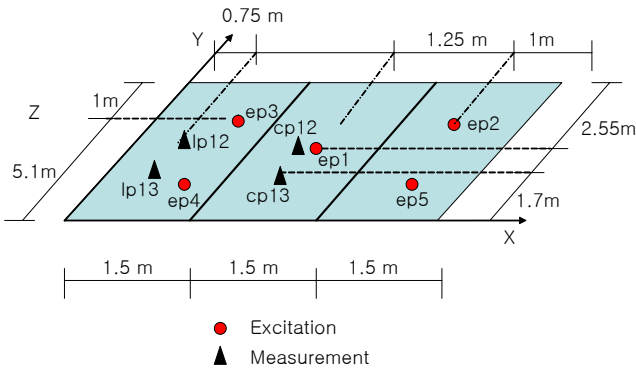


그림2. 바닥판의 형상 및 가진위치

가진 지점은 그림에서 원형모양을 가지는 것으로 중앙 1점(ep1)과 가장자리 4개 지점(ep2-ep5)이다. 진동특성을 고찰하기위한 계측위치는 세모모양으로 나타냈으며 4곳을 선정하였다.

해석의 단순성을 위해 슬래브의 경계조건은 4변이 단순지지 되어있다고 가정하였으며, 온돌층등 마감이 이루어지진 않은 맨바닥상태의 슬래브로 가정하였다. 해석에 사용된 바닥판의 크기는 4.5 x 5.1 m 이며 폭 1.5m를 가지는 3개의 PC 슬래브로 이루어 졌다. 수치해석에 사용된 PC슬래브, 점탄성소재 및 공기의 특성이 표 1에 나타나 있다. 표 1에서 점탄성소재의 값은 식(4)에 나타난 소재의 강성, 감쇠값이 식(11)의 음파위를 최소화 할 때의 값을 수치해석을 통해서 구한 것이다.

<표 1. 수치해석에 사용된 계계수>

바닥판 형상	폭	4.5m
	길이	5.1m
	지지조건	4변 힌지
PC slab	폭	1.475m
	길이	5.1m
	영계수	21.584 GPa
	포아송비	0.176
	밀도	2400kg/m ³
	두께	0.18m
점탄성소재	영계수	2.1 Mpa
	감쇠	5 kN/sec
	강성	1000kN/m
	설치폭	5 cm
공기	밀도	1.25 kg/m ³
	음속	340 m/sec

3.2 모드해석

점탄성소재가 설치된 바닥판의 진동특성을 알아보기 위하여 모드해석을 수행하였다. 점탄성소재 설치 전(완전독립거동), 그리고 일체형 2방향 슬래브와의 거동비교를 위하여

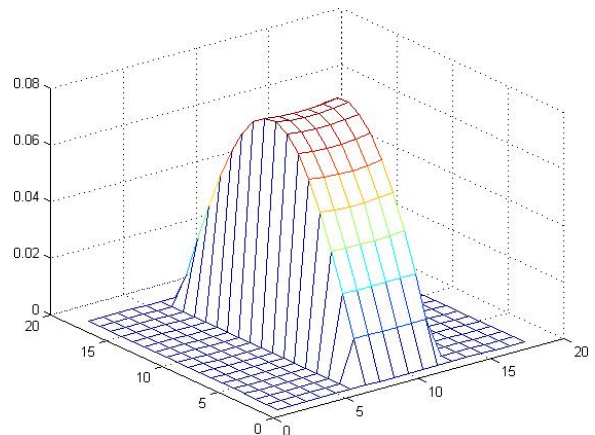
이들에 대한 모드해석을 병행하여 수행하였다. 표2는 점탄성소재 설치 전 후, 일체형 슬래브에 따른 고유진동수 값을 비교한 것이다. 각 슬래브형태에 따른 동적거동의 이해를 위하여 각각의 1차 모드형상을 그림 3에 나타내었다.

표 2에서 고유진동수는 접합이 견고해질수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 점탄성 소재 설치전의 경우의 고유진동수에서 동일한 진동수가 나타나는 것은 양끝에 있는 두개의 PC슬래브(3변 단순지지)가 각각 독립적으로 거동하면서 나타나는 현상이다.

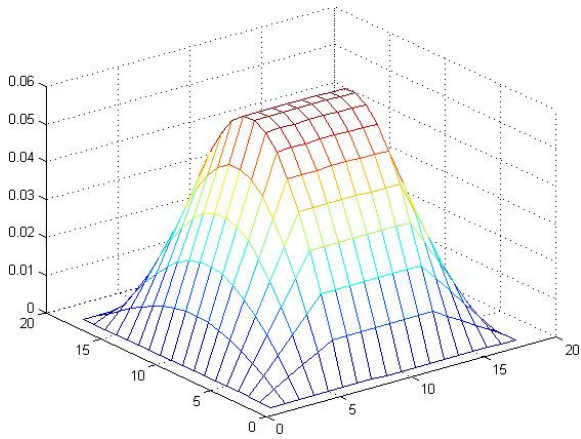
각각의 동적거동은 그 모드형상에서 뚜렷하게 차이가나는 것을 알 수 있다. 소재설치전의 경우 각 3개의 PC 슬래브가 독립적으로 거동하는 것을 알 수 있으며 점탄성소재 설치할 때의 모드형상은 3개의 슬래브가 연성거동을 보이거나 접합부에서 기울기가 달라지고 있으며, 2방향슬래브의 경우 모드형상이 완만해지는 것을 알 수 있다.

<표 2. 접합형식에 따른 고유진동수 비교>

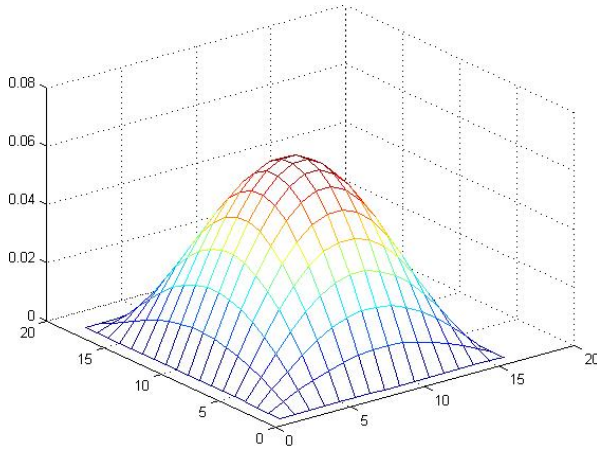
접합형식	설치 전 (Free)	설치 후 (VE)	이방향 (Two)
고유진동수 (Hz)	9.6955	15.0180	21.0345
	24.5406	28.8384	50.145
	24.5406	33.0318	53.996
	38.722	41.5355	82.8053
	44.8401	53.4342	97.941
	58.796	61.3691	116.5327
	58.796	62.0450	129.6767
	86.6915	88.1815	142.676
	94.54	98.3906	163.6048
	108.1034	109.5719	183.3994
	108.1034	109.7506	186.2571
	152.7468	153.6537	193.7882
	153.0104	155.3182	209.5628
	173.1446	174.4040	245.8581
173.1446	174.4670	246.651	



(a) 점탄성소재 설치 전 1차 모드형상 (Free)



(b) 점탄성소재 설치시 1차 모드형상 (VE)



(c) 이방향 슬라브의 1차 모드형상 (Two)

그림 3. 접합형식에 따른 1차 모드형상

3.3 진동저감효과

점탄성소재에 의한 바닥판의 진동저감효과를 고찰하기 위하여 동적 해석을 수행하였다. 동적해석에 사용된 하중은 충격하중이며 그 크기는 4000N 지속시간이 20msec인 반파형의 사인파를 사용하였다. 가진 위치와 진동계측지점은 그림 2와 같다.

그림 4는 동적해석에 가속도를 비교한 것이다. 계측지점 cp1/3에서의 가속도 값으로 각 접합형식에 의한 고유진동수의 차이에 의해서 거동이 달리 나타나고 있음을 알 수 있다. 1차 모드가 진동이 지배적으로 나타나고 있으며 Free의 경우 고유 진동수가 다른 접합형식보다 작게 나타나는 것을

알 수 있으며 점탄성 수재를 쓴 경우(VE) 약간 진동이 작게 나타나고 있으나 이방향 슬라브와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

그림 5는 그림4에 있는 시간영역의 가속도 값을 진동수영역에서 나타낸 스펙트럼의 값이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 각 접합형식에 따라 다른 스펙트럼을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 또한 1차 모드의 영향이 두드러지게 나타나고 있으며, 접합형식에 따라 큰 차이가 없으나 50-60Hz사이에서 이방향 슬라브의 크기다 타 접합형식보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 접합형식에 따른 진동저감효과는 그리 크지 않게 나타나는 것을 알 수 있다., 이것은 전술한 바와 같이 1차 모드의 진동이 바닥판 전체의 거동을 지배하고 있으며 접합형식에 따라 1차 모드의 저감효과는 크게 나타나지 않기 때문이다.

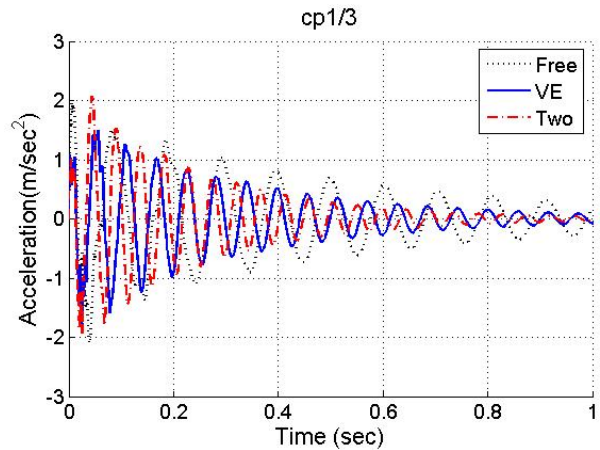


그림 4. 중앙 슬라브 중앙점을 가진 했을때 가속도 응답

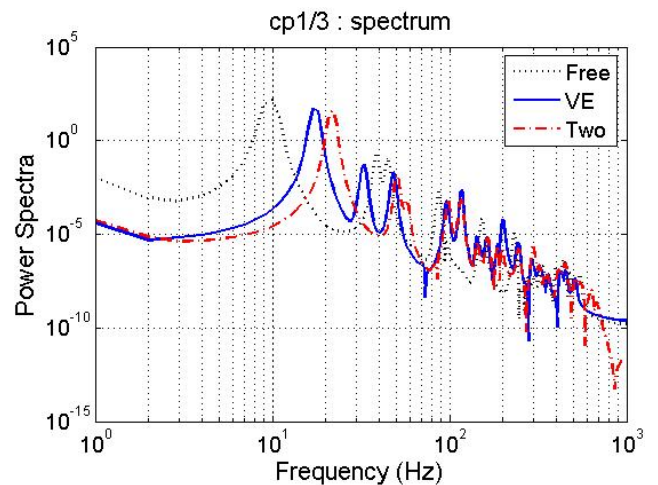


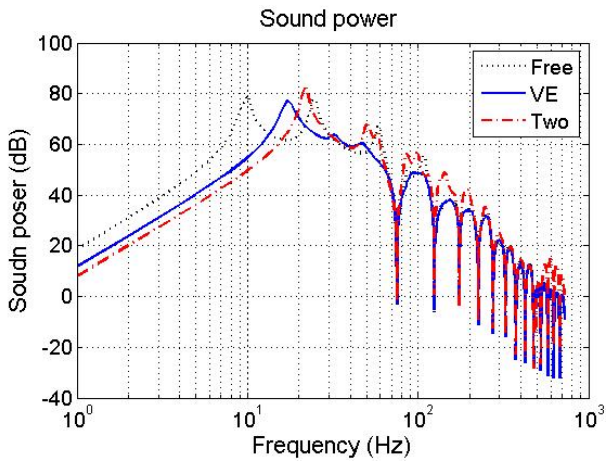
그림 5. 중앙 슬라브 중앙점을 가진 했을때 스펙트럼 응답

3.4 점탄성소재에 의한 소음저감효과

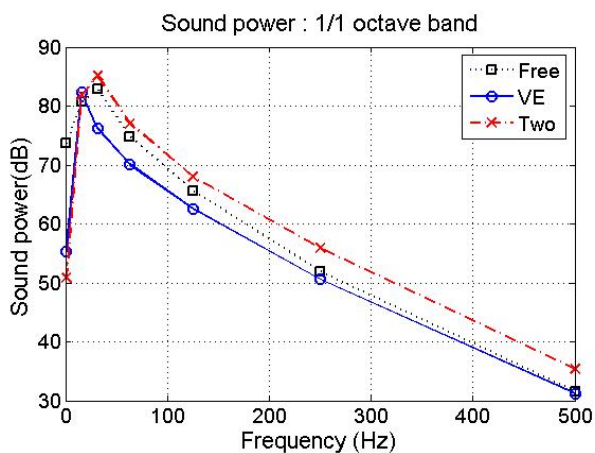
점탄성소재에 의한 소음저감효과를 평가하기 위하여 식 (4)에 의해 동적해석을 수행하여 바닥판의 속도장을 구하고 식 (11)을 이용하여 바닥판의 음파위를 구하였다. 해석 영역은 30Hz - 1000Hz사이로써 이 영역에서의 구조물 고유진동수를 포함하기 위하여 50차 모드까지 고려하였다.

가진위치는 그림 2와 같이 5곳으로 지정하였으며 음파위는 5곳의 음파위를 평균하여 구한 것이다.

그림 6는 점탄성소재의 유무, 2방향 슬래브에 따라 음파위 스펙트럼과 1/1 octave band로 나타내어 비교한 것이다.



(a) 음파위 스펙트럼



(b) 1/1 octave band 음파위

그림 6. 점합형식에 따른 음파위 스펙트럼

3가지 점합조건에 따른 소음 저감효과를 비교하기 위하여 그림 6 있는 1/1 옥타브 밴드를 각각의 점합조건에 따라 비교한 것이 그림 7에 나타나 있다. 평균 음압을 중심주파수 63.5, 125, 250, 500Hz에서 비교의 편의를 위하여 막대 그래프로 전환하여 나타낸 것이다. 그림 7에 있는 평균 음파위를 역 A단일 평가 지수법을 통하여 나타낸 바닥판의 중량 충격음을 표 3에 나타내었다.

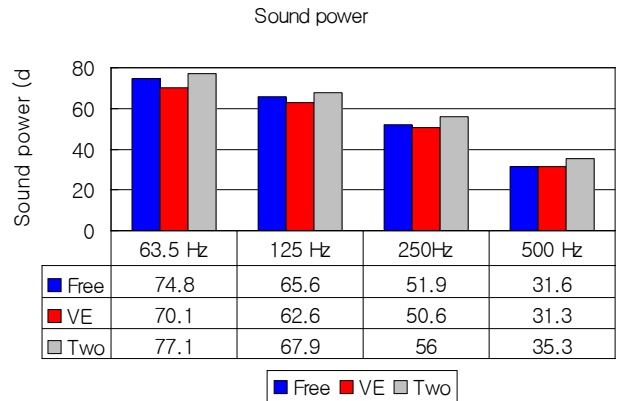


그림 7. 점합조건에 따른 평균 음파위 비교

<표3. 점합조건에 따른 중량충격음 저감효과 : 음파위 비교>

점합조건	Free	VE	Two
dB	49	45	51
저감량 (Two-V)	2	6	0

4. 결 론

본 연구에서는 점탄성소재가 연결된 PC슬래브의 진동 및 소음저감효과를 수치해석을 통하여 평가하였다. 점탄성 소재 설치전, 설치후, 일반적인 2방향 슬래브에 대한 수치해석을 통하여 배출소음을 평가하였으며 이들에 대한 비교를 통하여 점탄성소재에 의한 소음저감효과가 나타나고 있음을 확인하였다.

1) 부분구조합성법을 사용하여 독립 PC슬라브와 점탄성소재가 결합되었을 때의 수학적 해석모델을 유도하여 좀더 효율적으로 동적해석을 수행하는 방법을 제시하였다.

2) 음과워 해석법을 이용하여 슬래브 형식에 따른 배출소음을 평가한 결과 점탄성소재 설치전의 바닥판은 각각의 PC 슬래브가 독립적인 거동을 보임으로써 진동이 저감되는 경향이 나타나며 이러한 현상에 의해서 이방향 슬래브(Two) 비하여 2-3dB 정도 소음이 저감되는 것으로 나타났다.

2) 점탄성소재를 설치한 경우, 각 슬래브와 점탄성소재의 연성거동에 의해 접합부분에서 에너지가 소산됨으로써 독립적인 거동을 할 때보다 진동이 더욱 크게 저감되는 것을 알 수 있으며 그에 따라 이방향 슬래브에 비하여 6dB의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

3) 점탄성소재에 의한 진동 저감효과를 보면, 진동에 가장 큰 영향을 미치는 1차 모드의 진동크기가 각 슬래브형식과 관계없이 큰 차이가 없기 때문에 진동저감효과는 미소한 것으로 나타나고 있다. 그러나 고차모드의 진동성분을 보면 점탄성소재에 의하여 효과적으로 저감되고 있는 것으로 나타나 이러한 현상이 소음저감효과로 나타나는 것을 알 수 있다. 그러므로 소음저감을 위해서는 1차 모드진동보다 그 이상의 고차모드의 진동을 효과적으로 줄이는 것이 소음저감효과에 더욱 유리한 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임"(지방연구중심 대학육성사업/바이오하우징연구사업단) 또한 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(05 건설핵심 D 02)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) 건설교통부, 2006, 건설교통부 고시 제 2006-14호 주택성능등급 인정 및 관리기준.

(2) Moheimani S.O.R, Halim D., Fleming A.J., 2003, Spatial Control of Vibration : Theory and Experiments. World Scientific.

(3) Junger M.C. Feit D, 1994, Sound, Structures, and Their Interaction, 2nd Edition, MIT Press.

(4) 최연욱, 2001, 현대제어이론의 기초 -상태방정식에서 H ∞ 제어까지-, 청문각