한국지진공학회 논문집 | 제10권 제5호 (통권 제51호) | 2006년 10월, pp. 49~61

방진층을 설치한 주거용 건축물 바닥판의 진동해석을 위한 효율적인 해석모형

An Efficient Analytical Model for Floor Vibrations in Residential Buildings with Damping layer

김태호[1] · 이동근[2]

Kim, Tae-Ho · Lee, Dong-Guen

국문 요약 >> 본 연구의 목적은 방진층을 가진 바닥판을 포함한 건축물의 동적해석을 위하여 효율적인 모형화 방법과 이에 대한 해석법을 제안하는 것이다. 이를 위하여 방진층을 포함한 바닥판의 모형화를 위하여 바닥슬래브와 상부 마감층을 각각 독립적으로 모형화하고 이들 사이에 방진층을 의미하는 스프링 요소를 사용하였으며 방진층의 감쇠에 의한 비비례 문제를 해결하기 위하여 Newmark-β법을 적용하여 동적해석을 수행하였다. 상하부를 각각 모형화함으로서 방진층 상하부의 재료적 차이에 의한 감쇠거동을 정확하게 모형화할 수 있었다.

주요어 고차진동, 건축물, 바닥판, 방진층

ABSTRACT >> The floor impact sound insulations are installed frequently for reducing the floor impact sound into the floor slab of the residential buildings in recent years. Therefore the analytical FE model considering the insulation is needed for the sound and vibration analysis of the floor and it is necessary to use a refined finite element model for considering the large number of modes involved dynamic responses. So it is very difficult to use FE model because of the tiresome task for constructing the FE model, taking a lot of times for analysis and the impossibility of using the proportional damping. The efficient analysis and modeling method are proposed to the dynamic analysis for the floor with damping layer in this study. The floor slabs and finished layers are modeled individually and the spring elements that mean damping layers used to connect two parts. The dynamic analysis by the Newmark-β method is performed to solve the non-proportional damping problem due to the damping coefficient of insulations.

Key words high-frequency vibration, building, floor, damping layer

1. 서 론

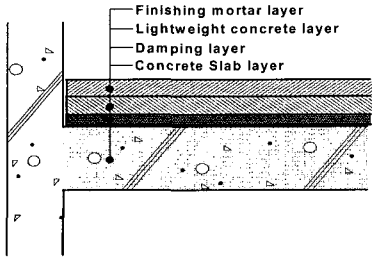
세밀한 진동해석을 수행하기 위해서는 이러한 구조물이 주로 영향을 받는 동적하중의 진동수 성분과 구조물의 주요 진동수를 파악하여야한다. 우선 동적하중을 살펴보면 구조물에서 기인하는 소음을 일으키는 하중은 사람이 뛰거나 무거운 물건을 떨어뜨리는 등의 경우이며 이들이 문제를 일으키는 진동수 대역은 200Hz이내이다. 구조물의 경우에는 문제가 되는 진동모드는 주로 바닥판이 진동하는 연직방향의 모드이고 이들은 대부분 수평모드에 비하여 높은 진동수를 가진다. 따라서 이러한 조건에 맞추어 적절히 해석하기 위해서는 높은 진동수를 표현할 수 있을 만큼 부재를 분할하여야하고 이는 바닥구조물과 같은 경우에 엄청난 수의 요소를 발생시킨다. 특히 최근에 국내의 주거 구조물과 같은 경우에는 소음 등의 문제를 해결하기 위하여 그림 1(a)과 같이 바닥판에 완충재를 삽입하여 시공한다. 이와 같은 경우에는 하나의 바닥시스템이 여러 개의 다른 재료들로 이루어진 적층판으로 이루어지게 되고 이를 해석하기 위해서는 기존의 단일재료의 바닥판에 비하여 몇 배의 자유도를 필요로 하며 해석모형의 작성 또한 상당히 어려운 점이 있다.

이러한 방진층을 가진 적층구조물의 모형화 문제와 관련

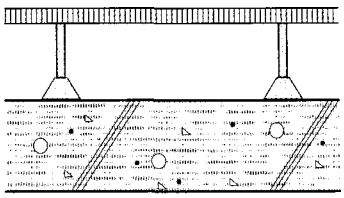
[1] 성균관대 건축공학과 박사후 연구원
[2] 성균관대 건축공학과 교수
(대표저자: dglee@skku.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 4. 19 / 심사종료일 : 2006. 8. 31)



(a) 뜬바닥 시스템



(b) 이중바닥 시스템

〈그림 1〉 주거 건축물에 사용되는 바닥시스템

하여 기존의 연구자들의 몇 가지 연구가 제안되어 있다. Kung과 Singh은 완충재와 같은 역할을 하는 damping patch를 부착한 보와 판의 동적해석에 관한 연구를 수행하였다.[1,2] 이 연구는 판과 보에 damping patch의 부착범위에 따른 동적응답에 관하여 분석한 것이다. Sun과 Tong은 보에 부분적으로 damping patch가 부착된 경우에 대하여 연구하였으며 이 논문은 damping patch가 부분적으로 떨어진 경우에 대해서도 고려하였다.[3] Sung Yi 등도 damping patch가 있는 적층구조물에 대한 유한요소해석법에 대하여 연구하였으며 캔틸레버 보를 대상으로 하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다.[4] Stewart와 Craik은 콘크리트 슬래브 위에 뜬바닥구조가 있는 경우에 대한 충격음 전달에 관하여 통계적 해석법(Statistical Energy Analysis)을 이용하여 연구하였다.[5] 이 연구는 기존의 콘크리트 위에 경량의 목재바닥판을 코르크 패드 등으로 연결된 구조에 콘크리트 바닥판 위에 고무와 같은 탄성층을 적용하였을 경우에 소음전달성능에 대한 것이다. 이들 논문은 대부분 damping patch의 적용위치 및 감쇠성능에 대한 관점에서 연구를 진행하였다.

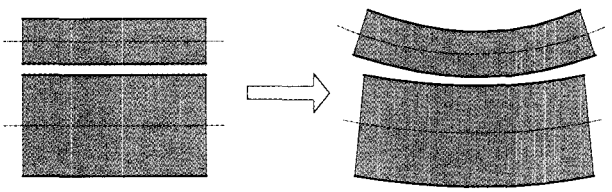
완충재를 포함한 적층구조물의 정확한 해석을 위해서는 앞서 밝힌 여러 연구들에 추가적으로 바닥시스템 전체를 모형화할 수 있는 방법이 필요하다. 적층판으로 이루어진 바닥시스템 전체를 모형화하는 것은 엄청난 자유도 수를 가지며 모든 자유도를 고려할 경우에는 PC로는 해석이 거의 불가능하다. 따라서 구조물의 응답을 손실하지 않는 범위에서 자유도를 선택하는 것이 필요하다. 주자유도의 수와 위치를 선택하는 방법이 기존의 연구자들에 의하여 몇 가지 제안되어 있다.[6-10] 본 연구에서는 방진층을 가진 바닥판을 포함한 건축물의 동적해석을 위하여 효율적인 모형화 방법과 이에 대한 해석법을 제안하였다. 방진층을 포함한 바닥판의 모형화를 위하여 바닥슬래브와 상부 마감층을 각각 독립적으로 모형화하고 이들 사이에 방진층을 의미하는 스프링 요소를 사용하였으며 방진층의 감쇠에 의한 비비례 문제를 해결하기 위하여 Newmark-β법을 적용하여 동적해석을 수행하였다. 상하부를 각각 모형화함으로서 방진층 상하부의 재료적 차이에 의한 감쇠거동을 정확하게 모형화할 수 있었다.

2. 주거용 건축물의 바닥진동해석 모델

2.1 주거용 건축물 바닥판

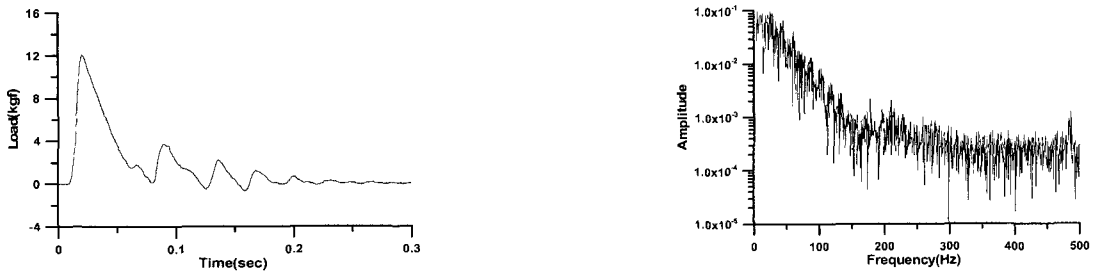
건축물의 바닥판은 주로 구조체인 콘크리트 슬래브와 용도에 따라 추가되는 마감층으로 구성된다. 주차장 등과 같이 무거운 하중을 받는 경우에는 마감층의 손상 등으로 인하여 구조체로 인식되지 않지만 주거나 사무용 등으로 사용되는 경우에는 마감층 또한 구조체와 일체로 거동하는 경우도 많다. 이러한 경우에 Kim과 Lee[10]에 의하면 등가의 적층바닥판을 사용하여도 모든 마감층을 고려한 경우와 비슷한 응답을 나타냄을 보였다. 그러나 그림 1과 같이 최근에 주거용 건축물의 바닥판에는 소음저감 등을 목적으로 방진재를 바닥판에 적용하는 경우가 많으며 이러한 경우에는 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 방진층 상부와 하부의 거동이 달라 바닥판은 더 이상 일체로 거동하지 않으며 등가의 적층바닥판을 사용하는 것은 적절하지 않다.

그리고 방진층 상하부의 바닥판들의 두께 및 재료적 특성이 다를 경우에는 방진층 상하부의 감쇠율의 차이에 따라서 그 동적거동도 다를 수 있다. 현재 사용되고 있는 구조해석 프로그램들은 모두 구조물 전체의 감쇠를 적용하는 방식으로 구성되어 있어 방진층 상하부 바닥판의 서로 다른 감쇠에 따른 거동을 표현할 수는 없다. 이러한 거동을 나타내기



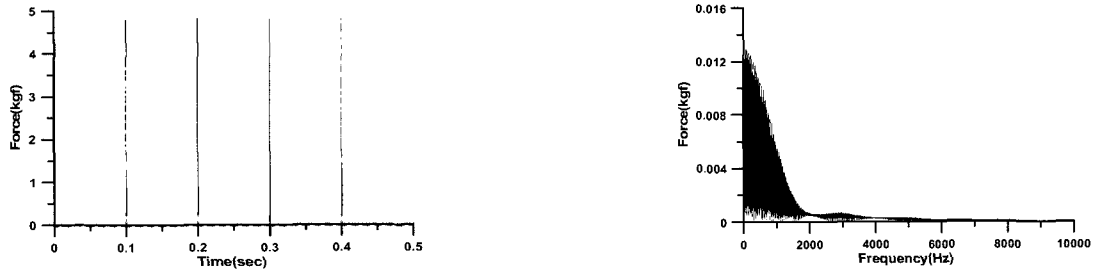
(a) 변형전 (b)변형후

〈그림 2〉 바닥시스템의 거동



(a) 시간이력 (b) 진동수 성분

〈그림 3〉 중량충격하중(공의 낙하)



(a) 시간이력 (b) 진동수 성분

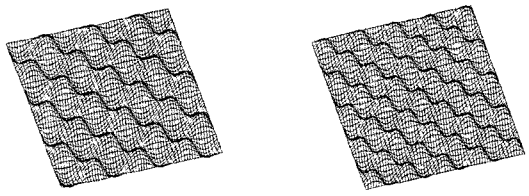
〈그림 4〉 경량충격하중(Tapping Machine의 하중 모사)

위하여 본 연구에서는 방진층 상하부를 판요소로 모형화하고 방진층은 감쇠를 가지는 선형스프링으로 모형화하였다.

이들이 사용한 가장 많은 요소는 판요소와 쉘요소이며 이 요소들에 다양한 재료적 특성-등방성, 이방성 등-을 고려하여 정확한 모형화를 시도하고 있다. 건축물 바닥판이 평평하고 주로 휨에 의하여 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 판요소를 사용하기로 한다. 사용한 요소는 얇은 판요소의 경우는 MZC[11] 사각형 요소이며 두꺼운 판요소의 경우에는 Mindlin-Reissner[12] 이론에 근거한 사각형 요소를 사용하였다.

2.2 바닥판에 작용하는 동적하중

건축물의 바닥판에 작용하는 동적하중은 그 용도에 따라 사람, 설비, 자동차 등 매우 다양하며 이들에 관한 연구[13]도 또한 이루어지고 있다. 건축물 바닥판에 작용할 수 있는 대표적인 하중으로 공을 떨어뜨렸을 경우(그림 3)와 하이힐과 같은 고차의 진동수를 포함한 경우(그림 4)가 있다. 그림 3의 하중은 직접 농구공을 1m 위치에서 로드셀에 떨어뜨려 직접 계측한 것이며 그림 4의 하중은 ISO 기준[14]에서 제시한 경량충격하중의 기준에 의하여 모사한 것이다. 그림 3의 하중은 120Hz 부분까지 하중이 분포하여 비교적 저차의 진동모드들에 관계되는 것을 알 수 있으며 그림 4의 하중은 2000Hz정도 까지로 넓게 분포하여 고차의 진동모드까지 관계되는 것을 알 수 있다.



(a) 7x7진동모드 (b) 9x9진동모드

〈그림 5〉 단순지지바닥판의 고차모드형상 예

2.3 주거용 바닥판에 적합한 바닥판 요소

(a) 전단변형을 고려한 판요소

건축물 바닥판에 그림 3이나 4와 같은 동적하중이 가해질 경우에 Lee[15]등의 연구에 따르면 전단변형을 고려한 판요소를 사용하는 것이 좋다고 밝히고 있다. 이것은 고차의 진동하중은 고차의 진동모드에 관계되고 그림 5(a)나 (b)와 같은 고차의 진동모드는 각각 폭이 7등분 또는 9등분된 단순지지바닥판이 반복된 것과 같다. 짧은 폭을 가지는 파형을 표현하기 위해서는 전단변형이 고려된 바닥판요소를 사용하는 것이 필수적이다. 그림 3과 같은 중량충격하중을 평가하는 데에는 충분히 정확하지만 그림 4와 같은 경량충격하중을 표현하는 데에는 좀 더 개선된 바닥판요소가 필요하다고 밝히고 있다.

(b) 적층판의 모형화

건축물의 바닥판은 주구조체로서 슬래브와 상부에 여러

층의 마감재로 이루어진다. 보행하중과 같이 하중의 크기가 크지 않은 동적하중은 슬래브와 상부의 마감층이 같이 거동하도록 하게 한다. 이에 Lee[15]등은 3개의 층으로 이루어진 일반적인 건축물 바닥판을 예로서 동적거동을 분석하였다. 이들은 일반적인 적층이론[16]으로는 300Hz부근의 진동모드들까지는 비교적 정확하게 모사하지만 그 이상의 고차진동모드들은 잘 나타내지 못하는 것으로 밝히고 있다.

2.4 동적하중에 따른 바닥판의 요소분할

동적하중에 의한 바닥판의 거동을 정확하게 파악하기 위해서는 동적하중의 진동수 대역을 충분히 고려할 만큼 바닥판의 요소를 분할하여야 한다. Lee[15]등의 연구에 따르면 식(4)와 같은 단순지지바닥판의 고유진동수식과 바닥판이 가지는 모드형상의 반복성을 이용하여 그림 6과 같은 요소분할 방식을 제안하였다.

$$f_c = \frac{\pi}{a^2}\sqrt{\frac{D}{\rho t}}, \quad D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \tag{1}$$

여기서 f_c는 한변의 길이가 "a"인 정방형 단순지지바닥판의 1차 고유진동수이며 D는 탄성계수가 E이고, 판의 두께가 t, 그리고 포아송비가 υ인 바닥판의 휨강성이고, ρ는 질량밀도이다.

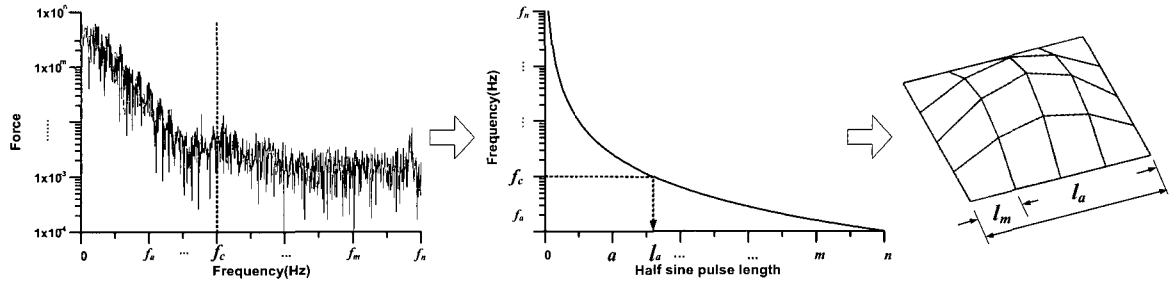
3. 방진층을 포함한 바닥판구조물의 모형화

3.1 바닥판의 해석모형

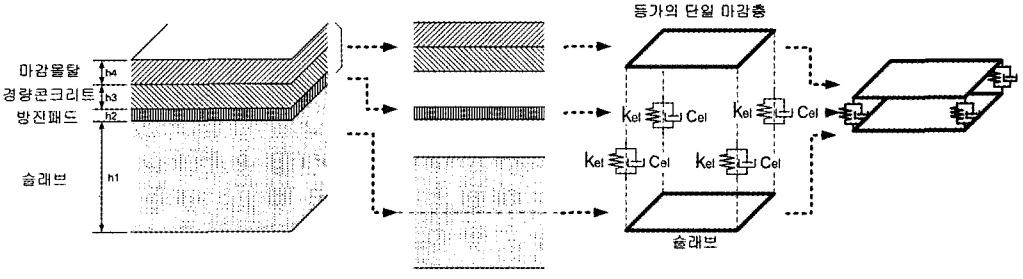
건축물 바닥판은 일반적으로 주로 슬래브와 그 용도에 따라 마감층을 가지는 적층판으로 이루어진 형태이다. 슬래브 위에 놓이는 마감층은 큰 충격이나 반복하중 등에 의하여 균열이 발생하기 쉽기 때문에 진동해석을 수행할 때 강성을 무시하고 질량의 추가효과만을 고려하는 경우가 많다. 그러나 주거용 건축물과 같이 진동문제보다는 진동으로 인한 소음 등의 문제가 더 크며 이들은 아이의 뜀과 같이 대부분 사람의 움직임에 의하여 발생한다. 이러한 경우에는 마감층의 강성이 구조물의 거동에 영향을 미치게 된다. 특히 최근에 소음저감을 위하여 많이 사용되는 방진층은 마감층이나 슬래브에 비하여 현저히 작은 강성을 지니고 있으며 이로 인하여 방진층 상부의 동적거동과 하부의 동적거동이 다소 다를 수 있다. 이러한 바닥시스템의 거동을 표현하기 위해서는 방진층 상부의 마감층을 모형화 하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 그림 7과 같이 방진층을 중심으로 방진층 상부와 하부를 각각 하나의 바닥판으로 모형화하고 방진층은 점성감쇠를 가진 선형 스프링으로 모형화하였다. 상부 마감층과 하부의 바닥슬래브를 포함한 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M_B}\ddot{\mathbf{D}}_\mathbf{B} + \mathbf{C_B}\dot{\mathbf{D}}_\mathbf{B} + \mathbf{K_B}\mathbf{D_B} = \mathbf{A_B} \tag{2}$$



〈그림 6〉 요소분할 결정과정



〈그림 7〉 방진층을 포함한 바닥시스템 해석모델

여기서 $\mathbf{M_B}$, $\mathbf{C_B}$, $\mathbf{K_B}$는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬이며 $\mathbf{A_B}$는 하중벡터이다. 각각은 다음과 같은 형태의 식으로 구성된다.

$$\mathbf{M_B} = \mathbf{M_M} + \mathbf{M_S} \tag{3}$$

$$\mathbf{K_B} = \mathbf{K_M} + \mathbf{K_S} + \sum_{j=1}^{n} \mathbf{K}_{el,j} \tag{4}$$

$$\mathbf{C_B} = \mathbf{C_M} + \mathbf{C_S} + \sum_{j=1}^{n} \mathbf{C}_{el,j} \tag{5}$$

$$\mathbf{A_B} = \mathbf{A_1} + \mathbf{A_2} \tag{6}$$

여기서 첨자 M과 S는 각각 방진층 하부의 슬래브를 포함한 주구조물과 상부의 마감층을 의미한다. $\mathbf{K}_{el}$과 $\mathbf{C}_{el}$은 방진층의 요소강성행렬과 요소감쇠행렬을 의미하며 n은 요소의 수이다. 감쇠행렬 $\mathbf{C_M}$과 $\mathbf{C_S}$는 Rayleigh감쇠를 이용하여 구한 것으로 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{C_M} = \alpha_M \mathbf{M_M} + \beta_M \mathbf{K_M} \tag{7}$$

$$\mathbf{C_S} = \alpha_S \mathbf{M_S} + \beta_S \mathbf{K_S} \tag{8}$$

여기서 α와 β는 두 개의 모드 감쇠비로부터 결정되며 본 연구에서는 마감층과 주구조물에 대하여 각각 고유치 해석을 수행하였으며 각각에 대하여 얻은 1, 2차 모드의 고유진동수를 이용하였다. 각 모드의 감쇠비(γ_i, i는 모드번호)와 상수 α, β의 관계는 다음과 같다.

$$\gamma_i = \frac{\alpha + \beta\omega_i^2}{2\omega_i} \tag{9}$$

3.2 구조물의 행렬응축

본 연구는 그림 3과 4에 제시된 것과 같이 높은 진동수 대역의 하중을 포함하여야 하며 이에 따른 응답을 정확히 표현하기 위해서는 많은 요소로 분할하는 것이 필수적이다. 그리고 방진층 상하부의 거동을 표현하기 위하여 바닥판시스템을 슬래브와 방진층 그리고 마감층으로 구분하여 모형화함으로서 바닥판을 모형화하는 데에 단일층을 가지는 모델의 2배에 이르는 자유도를 요구한다. 그래서 본 연구에서는 자유도 선택이 간편하면서도 많은 자유도를 줄일 수 있는 Lee의 방법[10]을 선택하였다. 이를 위하여 Guyan[17]의 동적행렬응축기법을 사용하였으며 이 기법은 상부 마감층과 하부 주구조물에 대하여 각각 적용되었고 다음의 과정으로 이루어져 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M_{AA}} & \mathbf{M_{AB}} \\ \mathbf{M_{BA}} & \mathbf{M_{BB}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{D}}_A \\ \ddot{\mathbf{D}}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K_{AA}} & \mathbf{K_{AB}} \\ \mathbf{K_{BA}} & \mathbf{K_{BB}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D_A} \\ \mathbf{D_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A_A} \\ \mathbf{A_B} \end{bmatrix} \tag{10}$$

여기서 $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬이며, $\mathbf{D}$와 $\ddot{\mathbf{D}}$는 각각 변위벡터, 가속도 벡터이고 A는 하중벡터이다. 그리고 A는 제거될 자유도이며 B는 남는 자유도를 나타낸다. 소거될 자유도 A의 변위가 B에 종속된다면 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\mathbf{D_A} = \mathbf{T_{AB}} \mathbf{D_B} = -\mathbf{S_{AA}^{-1}} \mathbf{S_{AB}} \tag{11}$$

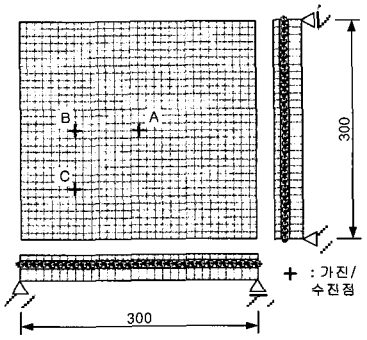
이 관계는 두 번 미분한 가속도 관계에서도 성립하고 이 관계를 이용하면 다음과 같이 응축된 새로운 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{M_{BB}^*} \ddot{\mathbf{D}}_B + \mathbf{K_{BB}^*} \mathbf{D_B} = \mathbf{A_B} \tag{12}$$

여기서 $\mathbf{K_{BB}^*}$와 $\mathbf{M_{BB}^*}$는 응축된 강성 및 질량행렬이다.

3.3 제안방법의 검증

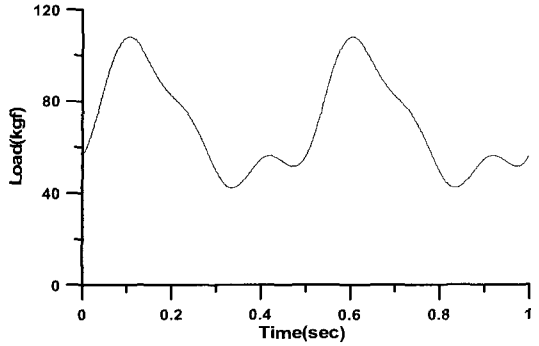
본 연구에서 제시한 방법의 정확성을 확인하기 위하여 그림 8과 같은 3m×3m의 단순지지 바닥판에 그림 9과 같은 동적하중을 적용하였다. 예제구조물의 물성치는 표 1에 나타낸 바와 같으며 제안방법이 마감층과 바닥슬래브층을 별도로 구성하고 방진층의 강성과 감쇠행렬을 이용하여 전체 구조물을 구성하고 있기 때문에 상용구조해석프로그램인



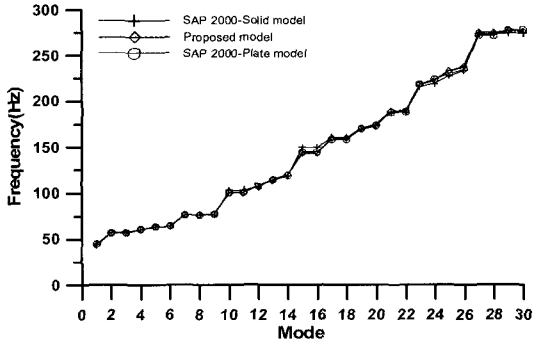
〈그림 8〉 예제 구조물

〈표 1〉 예제구조물의 물성치

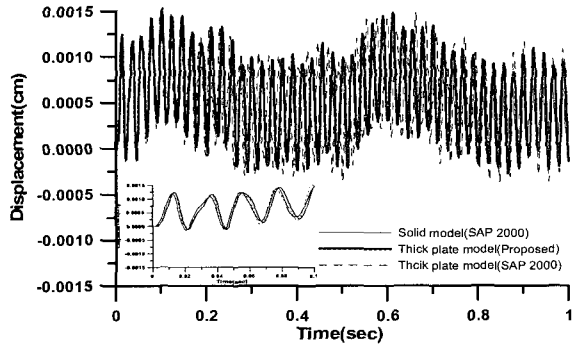
구조부재 \ 물성치	두께 (mm)	중량 (tf/m^3)	탄성계수 (kgf/cm^2)
마 감 층	80	1.85	2.04×10^5
방 진 재	20	-	4.00×10^0
슬 래 브	180	2.40	2.40×10^5



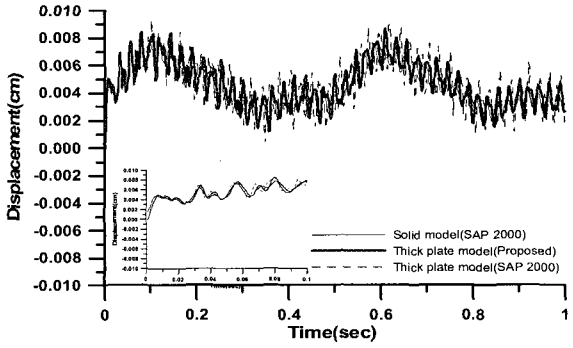
〈그림 9〉 보행하중



〈그림 10〉 요소에 따른 모드별 고유진동수 비교



(a) 상부 바닥판



(b) 하부 바닥판

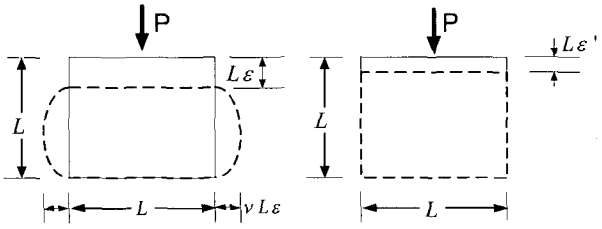
〈그림 11〉 바닥판 중앙의 변위 응답

SAP 2000의 솔리드해석모델과 판요소모델과의 비교를 위하여 구조물과 방진층의 감쇠가 없는 것으로 가정하였다.

각각의 요소를 이용한 모델들의 변위응답을 그림 11에 나타냈다. 감쇠가 없을 경우에 모든 모드들이 표현되어 복잡한 응답을 나타내는데 변위응답들을 살펴보면 미소한 차이가 있지만 전체적인 응답을 충분히 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 모드별 진동수와 진동모드형상 및 변위응답들을 통하여 알 수 있는 바와 같이 제시한 모델이 상용해석 프로그램의 솔리드 모델 및 판요소 모델과 제시한 해석모델이 거의 비슷한 결과를 주는 것을 확인할 수 있다.

4. 방진층의 강성

방진층을 구성하는 주요 재료는 발포폴리스틸렌, 발포폴리에틸렌, 방진고무 등이며 이들을 본 연구에서는 연직방향 강성과 감쇠를 가지는 스프링 모델로 치환하였다. 실제로 방진층은 재료의 특성에 따라 포아송비가 0인 경우도 있으며 고무와 같은 경우는 0.4~0.5에 이르는 경우도 있다. 횡방향으로 변형이 허용된 경우에는 그림 12(a)와 같이 포아송비가 직접적으로 연직방향의 강성에 영향을 미치지 않으나 본 연구에서와 같이 방진층이 좌우의 벽체 등에 의하여 막혀 있는 경우에는 그림 12(b)와 같이 횡방향 변위의 구속



(a) 방진층의 변형 형상 (b) 제안모델의 변형 형상

〈그림 12〉 방진층의 변형

효과에 의한 연직방향의 변형이 감소될 수 있다.

하중을 받지 않는 물체의 체적을 V_0라고 하면 축하중 P를 받는 물체의 체적 V_f는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$V_f = V_0(1-\varepsilon)(1+\nu\varepsilon)(1+\nu\varepsilon) \tag{13}$$

동일한 하중을 받는 경우에도 포아송비가 다르면 재하후의 물체의 체적은 각각 다르다. 그러나 제안하는 모델의 경우에는 연직스프링으로만 표현되는 모델로서 포아송비에 영향을 받는 횡방향 팽창을 구속함으로서 발생하는 연직방향의 변위의 감소를 나타내지 못하는 문제를 가진다. 이 문제를 해결하기 위하여 그림 12(b)와 같이 제안 모델을 포아송 비가 0인 경우와 같이 변하는 물체로 가정하면 식 (14)와 같이 쓸 수 있다.

$$V_f = V_0(1-\varepsilon') \tag{14}$$

식 (13)과 (14)를 같다고 놓으면 새롭게 얻을 수 있는 변형율(ε')에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\varepsilon' = \varepsilon - 2\nu\varepsilon - \nu^2\varepsilon^2 + 2\nu\varepsilon^2 + \nu^2\varepsilon^3 \tag{15}$$

여기서 변형율 ε 는 1보다 훨씬 작고 포아송비 ν도 1보다 작은 값이므로 제곱이상의 값은 굉장히 작은 값을 가지게 된다. 따라서 이들 항을 소거하여도 결과에 크게 영향을 미치지는 않을 것이며 식 (15)는 식 (16)과 같이 단순하게 쓸 수 있다.

$$\varepsilon' \approx \varepsilon(1-2\nu) \tag{16}$$

미소한 하중 δP와 방진층의 수직강성 K의 관계는 다음과 같다.

$$\delta P = K\varepsilon \tag{17}$$

동일한 방식으로 횡방향 구속이 있을 경우에 미소한 하중 δP에 의한 수정된 강성과 변형도의 관계는 식 (18)과 같다.

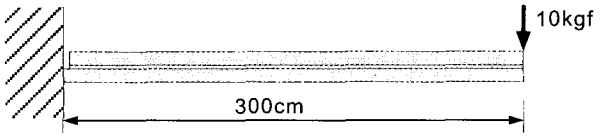
$$\delta P = K_{eff}\varepsilon' \tag{18}$$

변형율 ε'에 대한 식 (18)을 식 (16)에 대입하고 이를 식 (17)과 같다고 놓으면 식 (19)와 같은 유효강성을 얻을 수 있다.

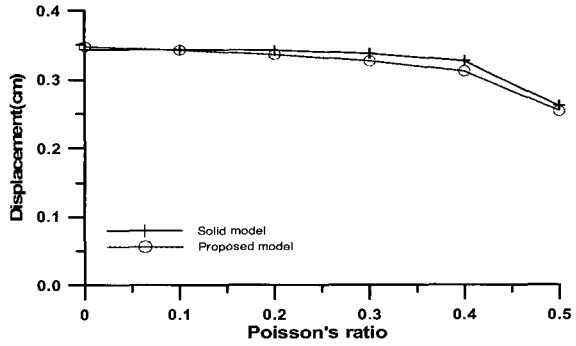
$$K_{eff} = \frac{K}{(1-2\nu)} \tag{19}$$

본 연구에서 적용하는 방진층 모델은 감쇠를 가진 스프링 모델로 특별히 재료의 포아송비 효과를 고려할 수는 없다. 위의 식 (19)를 이용하여 솔리드 모델과 제안식에 의한 유효강성을 적용한 바닥판 모델의 응답을 비교하였다. 예제는 그림 13과 같은 캔틸레버 적층판이며 상부와 하부판 모두 두께와 폭은 10cm, 탄성계수는 240000kgf/cm^2, 포아송비는 0.167이고 방진층의 탄성계수는 4kgf/cm^{2}이며 두께는 2cm이다. 솔리드 모델은 상하부 판의 경우에는 폭(5cm)×너비(5cm)×두께(5cm)로 요소분할하였으며 방진층은 폭(5cm)×너비(5cm)×두께(2cm)로 분할하였다. 제안모델은 상하부 바닥판을 동일하게 폭(5cm)×너비(5cm)로 분할하였다.

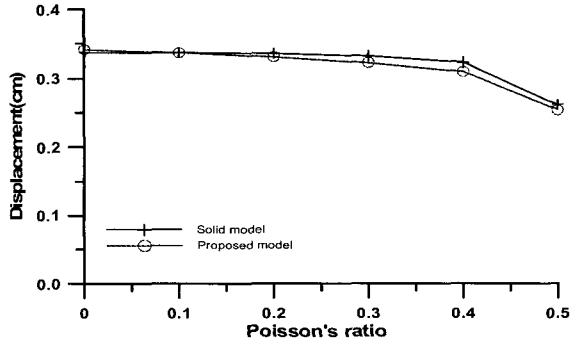
이 캔틸레버 구조물의 최대 처짐을 방진층의 포아송비에 대하여 나타낸 것이 그림 14이다. 포아송비의 변화에 따라 예제 구조물의 처짐이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 솔리드 모델의 거동을 제안모델이 비슷하게 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 표 2는 제안모델과 솔리드 모델의 처짐에 대한 비



〈그림 13〉 예제 구조물



(a) 방진층 상부 바닥판의 최대처짐



(b) 방진층 하부 바닥판의 최대처짐

〈그림 14〉 포아송비에 따른 예제구조물의 최대처짐

〈표 2〉 포아송비 변화에 따른 솔리드 모델과 제안모델의 처짐비

포아송비 / 처짐비	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
방진층 상부판	1.01	1.00	0.98	0.97	0.95	0.97
방진층 하부판	1.01	1.00	0.98	0.97	0.96	0.97

를 비교한 것으로 95%이내의 정확성을 가짐을 알 수 있다.

5. 방진층을 포함한 바닥판 구조물의 감쇠모델

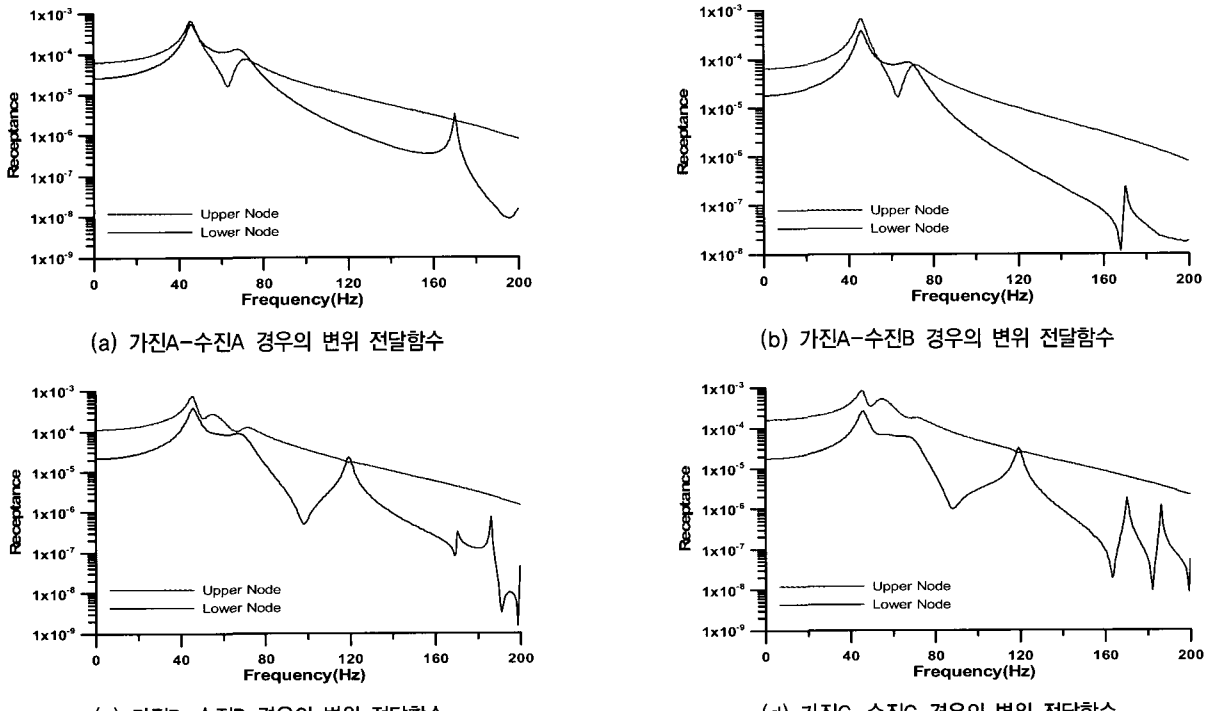
주거용 건축물의 바닥판에는 소음저감 등을 목적으로 방진재를 바닥판에 적용하는 경우가 많으며 이러한 경우에는 방진층 상부 바닥판과 하부 바닥판의 거동이 서로 다르기 때문에 더 이상 일체로 거동하지 않으며 등가의 적층바닥판을 사용하는 것은 적절하지 않다. 그리고 방진층 상하부의 바닥판들의 두께 및 재료적 특성이 다를 경우에는 방진층 상하부의 감쇠율의 차이에 따라서 그 동적거동도 다를 수 있다. 현재 사용되고 있는 구조해석프로그램들이 사용하고 있는 감쇠모델들은 모드감쇠나 Rayleigh 감쇠이다. 이들은 구조물 전체의 강성과 질량행렬을 이용하여 구성되며 이것은 본 연구와 같이 방진층을 사이에 둔 상하부 바닥판의 감쇠에 따른 동적거동을 나타내는데 충분하지 못하다.

본 연구에서는 일체로 거동하는 방진층 하부의 바닥 슬래브를 포함한 건축물과 방진층에 의하여 분리된 상부바닥판으로 구분하였으며 이들에 대하여 각각 식 (7)과 (8)을 통하여 감쇠행렬을 구성하였다. 구조물 전체의 감쇠행렬($\mathbf{C_B}$)은 각각 구성된 감쇠행렬에 방진층의 감쇠행렬($\sum_{j=1}^{n} c_{a,j}$)을 더하여 구성하였다. 이러한 감쇠모형화 방법과 기존의 방법을 비교하기 위하여 3.3절의 예제 구조물의 전달함수를 구하였다. 전달함수를 구한 위치는 예제 구조물의 A, B, C절점이다. 상하부 바닥판의 감쇠행렬을 구하는데 사용된 방법은 Rayleigh감쇠이며 상부 바닥판의 1, 2차모드 감쇠율은 각각 5%로 하였고 하부 바닥판의 1, 2차모드 감쇠율은 각각 3%로 두었다. 방진층의 감쇠율은 10%로 두었으며 이것은 현재 사용되는 방진재의 일반적인 감쇠율이다. 예제 구조물의 모드별 감쇠율들은 식 (20)과 같은 방법으로 구하였다.

$$\xi_i = \frac{\omega_{b,i} - \omega_{a,i}}{2\omega_{d,i}} \tag{20}$$

ω_d 는 i번째 모드의 공진진동수이고 ω_a, ω_b 는 i번재 모드의 공진진동수에서 전달함수의 크기(Receptance magnitude)보다 3dB($1/\sqrt{2}$)낮은 값을 가질 때의 진동수를 의미한다. 식 (20)과 그림 15에 나타낸 변위 전달함수들을 이용하여 그림 16에 나타낸 바와 같이 6개 모드의 감쇠율을 구할 수 있었으며 이에 대한 보간함수를 구하여 각 모드의 구조물 전체의 감쇠율을 추정하였다.

감쇠율을 추정한 이유는 앞서 설명한 바와 같이 실제 방진층 상하부의 거동이 재료적 특성에 따라 다를 수 있지만 현재 사용되는 상용해석프로그램들은 구조물 전체에 감쇠율을 적용하고 있기 때문이다. 구조물 전체에 감쇠율을 도입하는 것과 상하부에 별도의 감쇠율을 적용하는 방법의 차



(a) 가진A-수진A 경우의 변위 전달함수

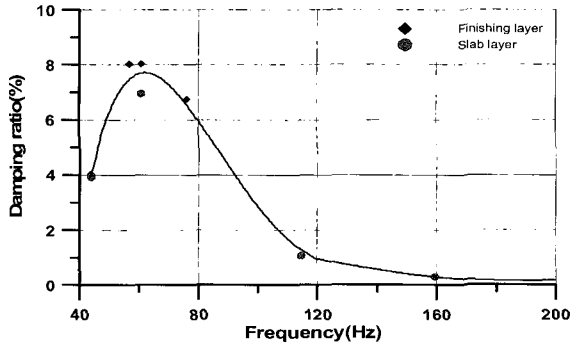
(b) 가진A-수진B 경우의 변위 전달함수

(c) 가진B-수진B 경우의 변위 전달함수

(d) 가진C-수진C 경우의 변위 전달함수

〈그림 15〉 변위 전달함수

이를 살펴보기 위하여 3.3절의 예제 구조물(그림 8)의 중앙(A 위치)에 10tf의 충격하중을 가하여 자유진동시켰다. 그림 17은 예제 구조물의 변위응답을 나타낸 것으로 SAP 2000의 해석결과가 마감층과 슬래브층 모두에서 더 큰 응답을 주는 것으로 나타났다. 특히 상부 마감층의 거동을 살펴보면 상용프로그램을 이용하여 구한 응답이 제안 방법의 것보다 훨씬 큰 응답을 주는 것으로 나타났다. 그리고 하부 슬래브 층에서도 응답이 다소 크게 평가 되었으며 이것은 구조물의 모드 감쇠에 방진층의 감쇠를 포함하기 위하여 방진층의 감쇠를 각 모드에 유효감쇠비로 추가하여 표현함으로 인하여 생기는 영향으로 보인다. 어쨌든 제시한 방법을 이용하면 두 층의 재료적 감쇠특성을 각각 반영할 수 있는 것을 확인할 수 있고 상용해석프로그램으로는 그 응답의 표현이 어려움을 확인할 수 있었다.

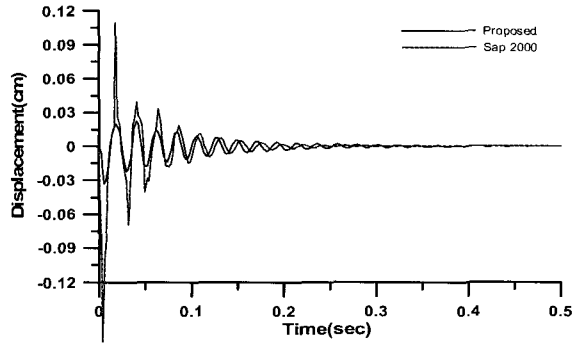


〈그림 16〉 계산된 감쇠율을 통한 모드별 감쇠율 추정

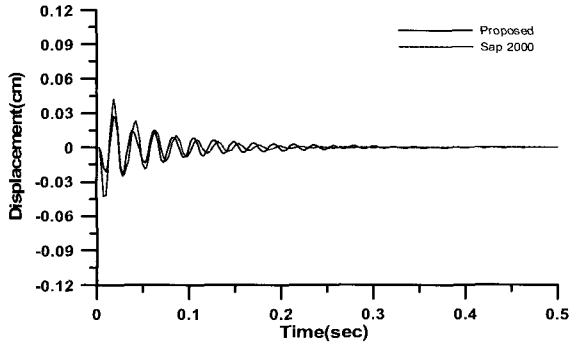
6. 예제 해석

6.1 예제 구조물과 해석모형

이 장에서는 방진층을 가지는 벽식 구조물을 대상으로 하여 고유치 해석, 요소분할방법, 전단변형의 고려여부 등을 통하여 제시한 방법의 효율성을 검증하고 각 모델에 따라 필요한 자유도수와 해석시간을 비교하여 보았다. 예제 구조물은 그림 18과 같으며 그림 3에 나타낸 중량충격하중을 적용하였으며 직접적분법을 사용하여 해석을 수행하였다. 예제 구조물의 물성치는 표 3에 나타내었으며 방진층 상부의 마감층과 하부의 슬래브에 대하여 하중의 상한 진동수를 약 120Hz로 둘 경우에 요소분할 기준을 나타낸 그림 19에 따라 최소한 37.5cm 간격(모델 W2)으로 요소분할이 필요함을 알 수 있다. 이에 따라 이보다 많은 분할(25cm)을 한 모델을 W1이라 하고 이 모델을 이용하여 구한 응답을 가장 정확한 것으로 가정하였다. 이것은 기존 상용프로그램들로는 모형화 방법이 차이가 있고 솔리드 모델을 이용할 경우

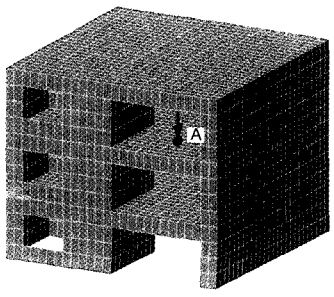


(a) 마감층 중앙의 변위 응답

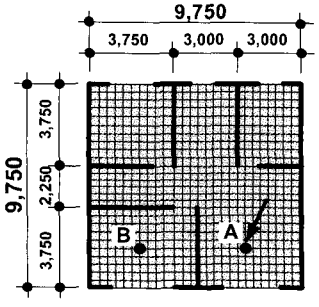


(b) 슬래브 중앙의 변위 응답

〈그림 17〉 충격하중에 의한 예제 구조물의 변위응답



(a) 입체 해석모형



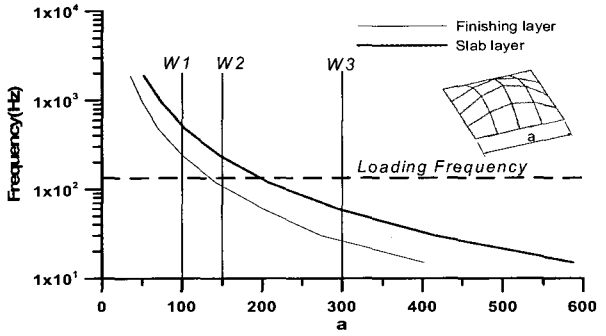
(b) 평면

〈그림 18〉 예제 구조물

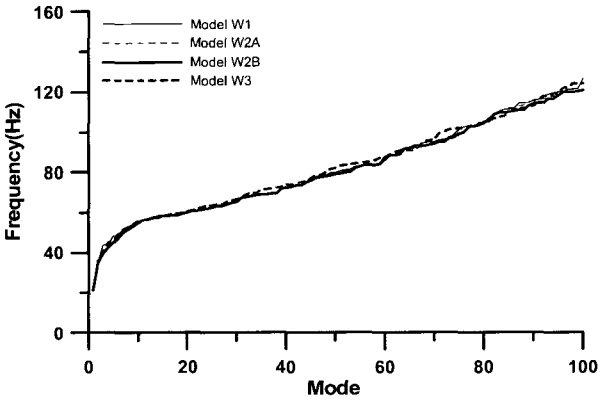
에는 너무 많은 요소가 발생하여 사실상 해석이 어렵기 때문이다. 75cm 간격으로 분할한 경우를 W3로 두었으며 이 경우는 제시한 요소분할 방법에 의한 최소분할조건에 못 미치는 경우이다. 모델 W2의 경우에는 전단변형을 고려한 경우를 A, 고려하지 않은 경우를 B로 구분하였다. 그림 18에서 볼 수 있듯이 가진점은 A이며, 동일한 층의 방 한가운데의 B점에서 수진하였다.

〈표 3〉 예제 구조물의 물성치

구조부재	두께 (mm)	중량 (tf/m^3)	탄성계수 (kgf/cm^2)	감쇠비 (%)
마 감 층	80	1.85	2.04×10^5	5
방 진 재	20	-	4.00×10^0	10
슬 래 브	180	2.40	2.40×10^5	3
벽 체	150	2.40	2.40×10^5	3



〈그림 19〉 예제 구조물의 요소분할 기준



〈그림 20〉 모델에 따른 모드별 고유진동수 비교

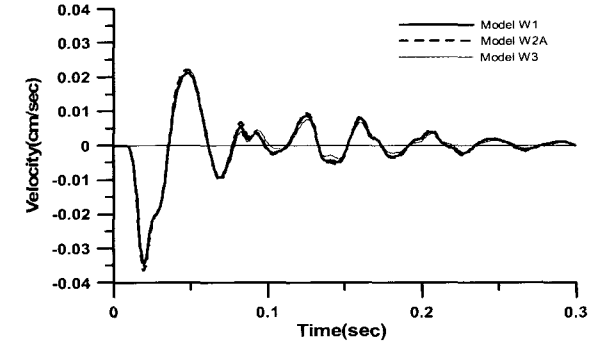
6.2 해석모형에 따른 예제 구조물의 응답비교

(a) 고유치 해석

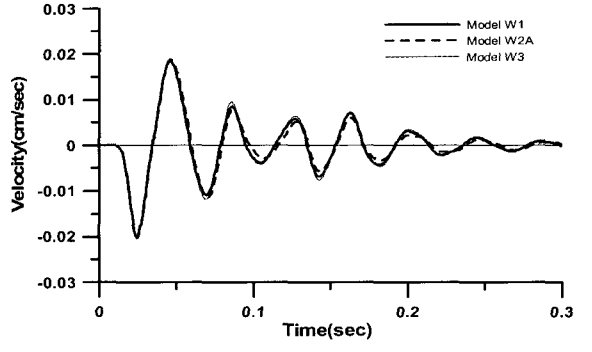
이 예제 구조물에 대하여 고유치해석을 수행하였으며 하중과 구조물의 모드들이 중복되는 30~120Hz구간에 대하여 가진층의 연직모드들에 대한 고유진동수를 100차 모드까지 그림 20에 나타내었으며 모든 모델들이 5%이내의 오차를 보이고 있다. W1과 W2A는 거의 대부분의 모드들과 고유진동수가 비슷한 것으로 나타났으며 W2B는 모드들은 비슷하지만 고차모드로 갈수록 고유진동수의 약간씩 차이가 나는 것으로 나타났다. W3도 저차진동모드에서의 고유진동수는 비슷한 편이지만 고차모드로 갈수록 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다.

(b) 요소분할에 따른 응답비교

중량충격하중을 가하여 구한 속도응답을 그림 21(절점 "A")과 그림 22(절점 "B")에 나타내었다. 가진점 "A"에서는 세가지 모델의 응답이 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며 요소분할의 크기가 가장 큰 W3모델이 응답의 크기를 미소하게 크게 평가하는 정도였다. 수진점 B의 경우에는 세 모델의 응답이 모두 비슷하지만 약간씩 차이를 보임을 확인할 수 있다. 이것은 가진점에서 멀어짐에 따라 구조물의 응답이 하중의 진동수 성분보다는 구조물의 진동모드에 영향을 많이 받게 되어 생기는 현상으로 판단되며 적절한 분할을 한 것으로 판단하였던 W2모델은 W3모델보다는 좋지만 마감층의 한계진동수보다 낮게 모델링한 것으로 인하여 오차가 생긴 것으로 생각된다.

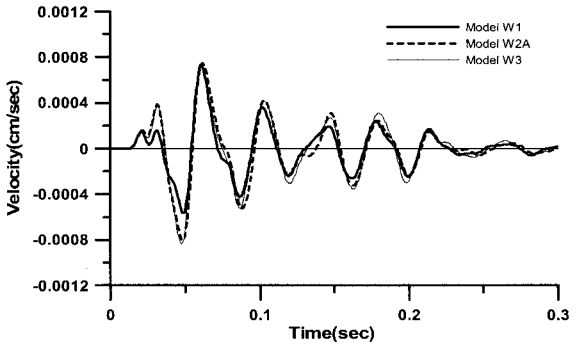


(a) 마감층

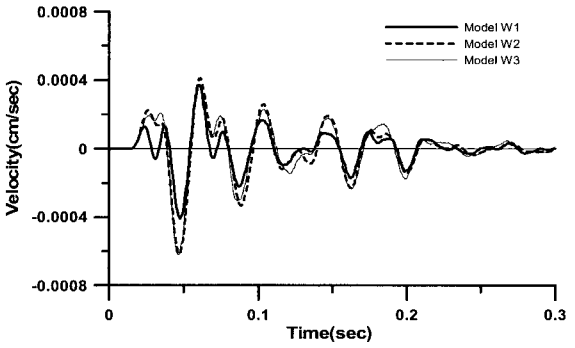


(b) 슬래브층

〈그림 21〉 가진점 "A"의 속도응답

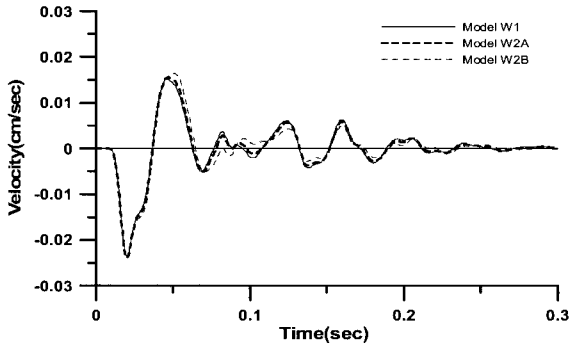


(a) 마감층

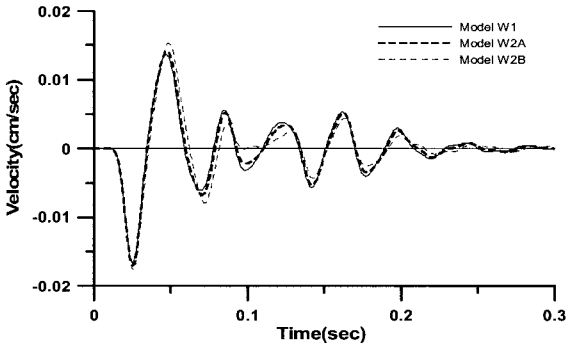


(b) 슬래브층

〈그림 22〉 수진점 "B"의 속도응답

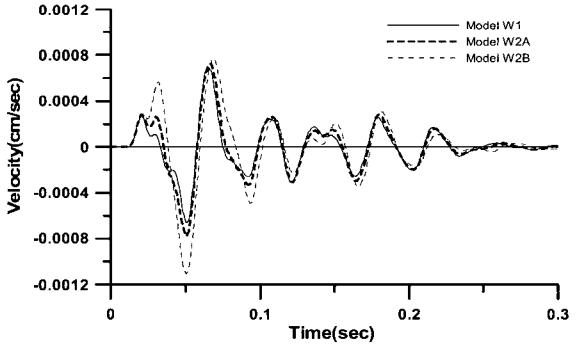


(a) 마감층

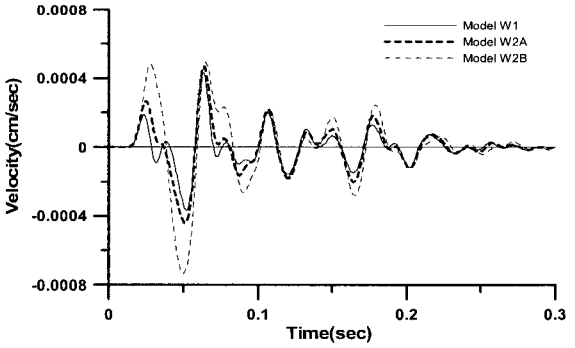


(b) 슬래브층

〈그림 23〉 가진점 "A"의 속도응답



(a) 마감층



(b) 슬래브층

〈그림 24〉 수진점 "B"의 속도응답

(c) 전단변형의 고려여부에 따른 응답비교

바닥판의 전단변형 고려여부에 따른 응답의 정확성을 비교한 그림 23과 24를 살펴보면 전단변형을 고려하지 않은 판요소를 사용한 모델 W2B가 가장 큰 오차를 가진 것으로 알 수 있다. 가진점에서도 오차는 눈에 띌 정도로 생겼으며 바닥판의 두께가 얇은 마감층에서는 덜하지만 두꺼운 슬래브 층에서는 좀 더 큰 오차가 발생함을 확인하였다. 이것은 전단벽체가 가지는 구속효과가 상당히 커서 바닥판의 크기가 큼에도 응답의 차이가 생김을 알 수 있다.

수진점인 "B"의 응답은 가진점에서보다 훨씬 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 전단변형을 고려한 W2A모델과 W1모델과도 약간의 응답차는 존재하지만 전단변형을 고려하지 않았을 경우에는 최대응답을 약 30%이상 크게 평가할 정도로 큰 오차를 가졌다.

6.3 해석모형에 따른 효율성 비교

고차의 진동하중을 받는 바닥판구조물의 해석을 위해서는 하중의 진동수 성분에 따라 반드시 적절한 요소분할이 필요하고 제안한 방법이 좋은 해결책이 될 수 있음을 보였다. 기존연구[15]의 바닥판과 기둥이 연결된 구조물의 해석결

〈표 4〉 예제구조물의 모델별 자유도 및 해석시간 비교 (단위:초)

	DOF	강성/질량행렬구성	고유치해석	시간이력해석	합계
W1	6877	23977.25	183.91	6269.47	30430.63
W2	5580	2064.32	110.67	3719.79	5894.78
W3	3402	90.62	4.03	120.98	215.63

과와는 다르게 벽체와 바닥판이 연결된 경우에는 경계부의 구속효과가 더 커져 전단변형이 고려된 판요소를 선택하는 것이 구조물의 정확한 응답을 얻는데 필수적임을 확인할 수 있었다.

각각의 해석모델들의 계산시간을 표 4에 나타내었으며 해석시간은 모델 W3가 가장 적게 소요되었으나 수진점에서 응답이 차이를 보였다. 본 연구에서 제시한 모델인 W2의 경우는 비교적 정확한 결과를 줄 수 있으면서도 많은 시간을 소요하지는 않았다. 모든 해석 모델은 전체 자유도를 고려할 경우에 해석이 어려워 행렬응축을 수행하였다. W1은 다른 모델과 같은 방식의 행렬응축을 할 경우에 개인용 컴퓨터에서는 해석이 불가능하여 추가로 벽체의 자유도와 지붕층의 슬래브 등에도 행렬응축을 수행하였으며 이에 따라 행렬응축에 대부분의 시간이 소요된 것으로 나타났다.

7. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 방진층을 가진 바닥판을 포함한 건축물의 동적해석을 위하여 효율적인 모형화 방법과 이에 대한 해석법을 제안하였다. 방진층을 포함한 바닥판의 모형화를 위하여 바닥슬래브와 상부 마감층을 각각 독립적으로 모형화하고 이들 사이에 방진층을 의미하는 스프링 요소를 사용하였다. 방진층 상하부를 각각 모형화함으로서 방진층 상하부의 재료적 차이에 의한 감쇠거동을 정확하게 모형화할 수 있었으며 구조물 전체에 대하여 감쇠를 부여하는 상용해석프로그램으로는 이를 잘 나타낼 수 없었음을 확인하였다.

제안한 해석모델은 방진층을 감쇠를 가지는 스프링으로 모형화한 것으로 포아송비를 고려하지 못한다. 이를 극복하기 위하여 방진층의 유효강성에 포아송비를 고려할 수 있는 방법을 제시하였으며 오차범위(5%)이내의 정확성을 가짐을 확인하였다. 고차의 진동하중을 받을 경우에는 이를 충분히 고려할 수 있는 요소분할이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구는 방진층 감쇠의 영향을 고려하기 위하여 직접적분법을 이용하여 해석을 수행하였으며 이로 인하여 해석시간이 증가하는 경향이 있었다. 추후에는 방진층의 비비례감쇠를 고려할 수 있는 모드해석법에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. (KRF-2004-041-D00759)

참 고 문 헌

1. Kung, S. W. and Singh, R., "Vibration Analysis of Beams with Multiple Constrained Layer Damping Patches," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 212, No. 5, 1998, pp. 781-805.
2. Kung, S. W. and Singh, R., "Complex Eigensolutions of Rectangular Plates with Damping Patches," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 216, No. 1, 1998, pp. 1-28.
3. Sun, D. and Tong, L., "Modeling and Vibration Control of Beams with Partially Debonded Active Constrained Layer Damping Patch," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, No. 3, 2002, pp. 493-507.
4. Yi, S., Ling, S. F. and Ying, M., "Finite Element Analysis of Composite Structures with Smart Constrained Layer Damping," *Advances in Engineering Software*, Vol. 29, No. 3-6, 1998, pp. 265-271.
5. Stewart, M. A. and Craik, R. J. M., "Impact Sound Transmission through a Floating Floor on a Concrete Slab," Applied Acoustics, Vol. 59, 2000, pp. 353-372.
6. Ramsden, J. N. and Stocker, J. R., "Mass Condensation a Semi- Automatic Method for Reducing the Size of Vibration Problems," *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 1, 1969, pp. 333-349.
7. Down, B., "Accurate Reduction of Stiffness and Mass Matrices for Vibration Analysis and a Rational for Selecting Master Degrees of Freedom," *J. Mech. Design*, ASME, 1980, 102pp.
8. Shah, V. N. and Raymund, M., "Analytical Selection of Masters for Reduced Eigenvalue Problems," *Int. J. Numer. Mech. Eng.*, Vol. 18, 1982, pp. 89-98.
9. Wilson, E.L. and Habibullah, A., SAP2000-Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Users Manual. Computers & Structures Inc., Berkeley, California 1998.
10. 김현수, 이동근, "벽식구조물의 효율적인 연직진동해석", 한국지진공학회 논문집, 제 8권, 제 6호, 2004.12., pp. 55-66.
11. Weaver, W. and Johnston, P. R, *FINITE ELEMENTS FOR*

STRUCTURAL ANALYSIS, Prentice-Hall, Inc., 1984, pp. 77-82, 205-209.

12. Kwon, Y. W. and Bang, H. C., *THE FINITE ELEMENT METHOD Using MATLAB*, CRC Press, 2000, pp. 77-82, 370-401.
13. Bachmann, H. and Ammann, W., *Vibration in Structures*, IABSE, 1987.
14. ISO 140-7, *Field measurements of impact sound insulation of floors*, International Organization for Standardization, 1998.
15. 김태호, 이동근, "고차의 진동하중을 받는 건축물 바닥판의 효율적인 바닥진동해석", 한국지진공학회 논문집, 심사중.
16. Ugural, A. C., *STRESSES IN PLATES AND SHELLS*, Mcgraw-Hill, 1999, pp. 253-280.
17. Weaver, W. and Johnston, P. R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
18. Inman, D. J., *Engineering Vibration, 2nd ed.*, Prentice Hall, 2001.