

등가플레이트 요소를 이용한 일방향 중공슬래브의 동적해석에 관한 연구

A Study on the Dynamic Analysis of One-way Hollow Slab Using Equivalent Plate Element

강 주 원* 임 준 호** 채 승 훈*** 김 기 철**** 석 근 영†
Kang, Joo-Won Lim, Jun-Ho Chae, Seoung-Hun Kim, Gee-Cheol Seok, Keun-Young

요 지

중공슬래브 시스템은 슬래브 두께가 증가해도 자중은 크게 증가하지 않으면서 일반슬래브에 비해서 휨강성이 크게 저하되지 않는 장점이 있다. 그러나 이러한 장스팬 구조의 경우 바닥판 진동의 증가에 의한 사용성 문제가 발생할 수 있고, 특히 중공슬래브의 경우 기존의 구조시스템과 동적특성이 상이하다. 따라서 진동에 대한 중공슬래브의 안전성 및 사용성 검토가 요구되고 있으며, 이를 위한 실용적인 정밀해석이 필요하다. 본 연구에서는 효율적인 고유치 해석을 위하여 일방향 중공슬래브의 동적특성을 비교적 정확하게 나타낼 수 있는 등가의 플레이트 모델을 사용하였다. 결론적으로 등가플레이트 모델이 일방향 중공슬래브의 동적특성을 비교적 정확하게 나타내는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 일방향 중공슬래브, 등가플레이트 모형화, 동적해석

Abstract

Considering that the weight of a hollow slab system is not increased with an incremental increase in its thickness, and that the flexural stiffness of a hollow slab is not significantly lower than that of a general slab, there has been a growing need for hollow slab system, because long span structures are in great demand. In a long span structure, the problem of vibration of floor slabs frequently occurs, and the dynamic characteristics of a hollow slab system are quite different from the conventional floor system. It is required to investigate the safety and the serviceability of hollow slab. Therefore, there exists a necessity for accurate vibration analysis. Hollow slab should be modeled by refined mesh for accurate vibration analysis. For the efficiency of the Eigenvalue Analysis, an equivalent plate slab model when can relatively precisely represent the dynamic behavior of a one-way hollow slab system is used. In conclusion, equivalent plate models relatively precisely presented the dynamic characteristics of one-way hollows.

Keywords : one-way hollow slab, equivalent plate model, dynamic analysis

1. 서 론

1.1 연구의 목적

현대 도심지의 건축물은 경제적, 사회적 요구에 의하여 고층화, 대형화되는 경향이 강하고, 구조공학 기술의 발전에 따

라 장스팬화가 이루어지므로 진동 및 소음이 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 특히 주거용으로 이용되는 공동주택의 경우 상층부의 진동이나 소음이 슬래브를 타고 넘어와 하층부에 그 진동이나 소음을 그대로 전달하고 있어 이웃 간에 많은 분쟁의 원인이 되고 있다. 이로 인해 주택건설기준 등에 관한 규정, 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기

† 책임저자. 정회원 · 영남대학교 공업기술연구소 연구원
Tel: 053-810-3544 ; Fax: 053-810-4625
E-mail: sky8983@ynu.ac.kr

* 정회원 · 영남대학교 건축학부 정교수

** 정회원 · 영남대학교 대학원 건축학과 석사과정

*** 정회원 · 영남대학교 대학원 건축학과 박사과정

**** 정회원 · 서일대학 건축과 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2013년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

준과 같이 구조적, 환경적 측면에서 정부의 정책 및 기준이 강화되고 있다(김민규 등, 2009; 박현재, 2009).

따라서 이러한 기준을 만족시키기 위하여 기존의 구조시스템에서 슬래브의 두께를 증가시키거나 새로운 구조 상세를 적용하는 등의 변화가 있어 왔다. 하지만 진동 및 소음문제를 완화시키고자 슬래브의 두께를 증가시키게 되면 슬래브 중량이 증가될 뿐만 아니라 기둥, 벽, 기초 등과 같은 수직 부재의 크기가 증가되어 건축물 전체의 중량 및 소요 물량이 크게 증가하게 된다. 이러한 건축물의 중량 및 소요 물량의 증가는 건축물의 경제성을 떨어뜨리고, 지진하중을 증가시키기 때문에 부정적인 요인으로 작용하게 된다(강주원 등, 2008; 김기철 등, 2007).

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 다양한 바닥판 시스템의 개발이 계속적으로 진행되고 있으며, 중공슬래브 시스템도 하나의 대안이 될 수 있을 것이다. 중공슬래브 시스템의 정확한 해석을 위해서는 중공슬래브에 매입되는 중공의 형상이, 슬래브의 동적거동에 미치는 영향을 고려할 수 있는 유한요소 해석모델을 사용해야 하는데, 기존의 연구에서 등가의 플레이트로 모델이 1방향 중공슬래브의 정적특성을 효율적이면서 정확히 표현할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 진동수 및 고유형상의 비교와 보행하중에 대한 진동해석을 통하여 기존의 등가플레이트 모형화 방법이 일방향 중공슬래브의 동적특성을 정확히 표현할 수 있는지 검증하였다.

1.2 연구의 방법 및 절차

기존의 일방향 중공슬래브의 등가플레이트 모형화 방법에 관한 연구를 바탕으로, 정적해석시 정확성과 효율성이 비교적 높은 처짐비식 모델과 직교이방성판식 모델을 선정하였다. 등가강성 산출방법을 다르게 한 등가플레이트 모델이 중공슬래브의 구조적 특성을 잘 나타내는지 검증하기 위하여 비교적 정해라 할 수 있는 3차원 입체요소 모형화 방법과의 진동수 및 고유모드형상 그리고 보행하중에 대한 시간이력해석을 비교하였다. 해석은 상용구조해석 프로그램(MIDAS Gen/w)을 사용하였고, 중공슬래브의 특성을 비교하기 위하여 중공이 없는 철근콘크리트 슬래브와 일방향 중공슬래브 시스템을 예제 구조물로 선정하였다.

2. 중공슬래브 시스템의 기존연구 고찰

2.1 바닥진동 및 충격음 저감을 위한 중공슬래브의 적용

공동주택에서 쾌적한 주거환경을 형성하는데 있어 소음 및

진동 방지대책은 필수적인 요소이다. 인간의 보행, 물건의 낙하, 어린이들의 뛰어나 달림, 가구 및 물건들의 이동에 의해 바닥구조물에 충격이 가해지면서 슬래브는 굴곡 진동하고, 그 미소진동이 인접공기의 압력변화를 일으켜 공기 중에 으으로써 방사되는 것을 바닥충격음이라 말한다. 이러한 바닥충격음은 공기와 구조체를 통해 전달되고, 충격특성에 따라 경량충격음과 중량충격음으로 구분한다. 최근 사회적인 문제가 되고 있는 중량충격음은 현재의 시공방법 및 바닥구조방식으로는 필요한 성능을 만족하기 어려운 실정이다. 그 결과 표준바닥구조 혹은 인정바닥구조를 사용한 공동주택에서도 층간소음의 분쟁이 발생하고 있다(장재희, 2002).

슬래브의 두께와 완충재에 의해 중량 충격음을 저감시켜 온 기존 방식의 한계를 벗어나, 최근에는 구조적인 방법을 통하여 중량 충격음을 저감시키려는 노력이 이루어지고 있다. 일방향 중공슬래브는 기존의 일반슬래브와 비교하여 중량충격음의 차단성능이 우수하다고 보고되고 있다. 그 이유는 일방향 중공슬래브가 가지는 일방향 거동과 그로부터 나타나는 진동특성에 근거한다. 기존슬래브는 이방향 진동특성을 가지기 때문에 중량충격음에 영향을 미치는 50~150HZ 사이의 고차모드가 많이 나타나는 반면, 일방향 중공슬래브는 상대적으로 고차모드의 분포가 작게 나타나기 때문이다. 또한 이웃하는 중공슬래브와의 접합방식에 따라 전파되는 진동이 차단되어 횡방향으로 전달되는 진동의 크기 또한 작아진다.

이러한 결과를 바탕으로 공동주택에 일방향 중공슬래브를 적용하게 되면 층간소음 및 진동의 저감을 비롯하여 거주자에게 보다 정온한 주거환경을 제공할 것을 예상할 수 있다.

2.2 중공슬래브 시스템의 등가플레이트 모형화

중공슬래브의 정확한 해석을 위해서는 중공체의 형상을 정밀하게 모형화 하느냐가 중요하다. 그래야만 중공형상에 의한 슬래브의 동적거동 특성의 변화를 잘 반영할 수 있기 때문이다. 이를 위하여 3차원 입체요소를 사용하여 중공슬래브를 모형화하는 방법을 사용하게 된다. 이때 유한요소(이하 요소망)의 크기가 작을수록 중공의 형상을 정확하게 표현할 수 있으며 더욱 정확한 해석이 이루어진다.

요소망의 크기가 작을수록 동적거동을 정확하게 표현할 수 있지만 해석모델의 절점 및 요소수의 증가로 해석에 많은 시간이 소요된다. 게다가 어느 규모 이상에서는 컴퓨터 메모리의 제한으로 인해 중공슬래브의 해석이 불가능해진다. 중공슬래브만의 해석에도 이러한 제한이 있기 때문에 실제 중공슬래브가 사용된 구조물 전체의 해석은 일반적인 컴퓨터를 사용해서는 불가능하다. 또한 중공슬래브를 모델링하는 과정

에서도 정밀하게 중공을 표현하기 위해서는 많은 노력과 시간이 요구된다. 따라서 가장 정확한 진동해석의 결과를 얻을 수 있음에도 불구하고 중공슬래브의 모형화 방법으로 사용하기에는 실용적이지 않다고 할 수 있다.

플레이트 요소는 장변 길이에 대한 두께의 비가 1/10정도로 현저하게 작은 요소로써 막작용(in-plane membrane action)과 휨작용(out-of-plane bending action)의 조합에 의해 외부하중을 효과적으로 지지하는 요소이다. 이는 슬래브의 평면인장 및 압축거동, 평면전단거동, 두께방향의 휨거동, 두께방향의 전단거동 등을 고려할 수 있어, 실제 슬래브를 모형화하기에 가장 적합한 요소라고 할 수 있다. 이러한 플레이트 요소가 중공슬래브의 동적특성을 잘 반영할 수 있다면 3차원 입체요소를 사용하는 것에 비해 절점의 수를 대폭 줄이면서도 해석의 정확성도 충분히 확보할 수 있을 것이다.

3. 일방향 중공슬래브의 등가플레이트 모형화

3.1 예제 중공슬래브

본 논문에서 일방향 중공슬래브의 모형화와 수치해석에 사용될 예제 슬래브는 4200mm×3150mm크기의 바닥판으로 두께는 표준바닥구조체 두께인 210mm이며, 일반적으로 사용하는 중공이 없는 슬래브와 일방향 중공관이 적용된 슬래브로 구분하였다.

슬래브의 길이방향, 즉 평면상의 장변 방향으로 중공관을 적용하였고 중공비에 따른 슬래브의 특성을 살펴보기 위하여 각기 다른 지름의 THP 주름관을 사용하였다. 중공관이 없는 일반슬래브는 Slab-0로 명하였고, 중공비에 따라 각각의 중공슬래브 모델을 Slab-A~E라 명하였다. 예제 슬래브는 각 모델별로 체적감소율이 일반슬래브에 비하여 6.4%, 14.4%, 25.6%, 40.1%로 모두 다르기 때문에 동적특성이 상이할 것으로 사료되며 상세한 제원은 표 1과 같다.

또한 일방향 중공슬래브의 모형화 방법별로 동적특성을 비교하기 위하여 고유치해석을 통한 진동수 및 고유모드형상을

비교하였다.

3.2 3차원 입체요소 모형화 및 보행하중 적용

보행하중에 의한 진동특성을 비교해 보기 위하여 3차원 입체요소를 사용한 시간이력해석을 수행하였다. 슬래브에 사용한 콘크리트의 강도는 일반적으로 사용하는 24MPa로 하였으며 슬래브는 4번 고정된 것으로 가정하였다. 3차원 입체요소의 요소망은 THP주름관의 형상을 비교적 잘 반영하면서 해석범위 내에서 모형화가 가능하도록 30mm로 하였다. 모든 예제 슬래브에 대하여 동일하게 3%의 감쇠비를 적용하였고, 보행자가 이동할 때 발생하는 하중을 고려하기 위하여 Baumann K.와 Bachmann H.가 제안한 보행자의 1step 하중을 사용하였다. 보행하중의 적용방법은 그림 1과 같이 큰 진동을 유발할 수 있도록 보행자가 슬래브의 대각선 방향으로 이동할 때 1step에 해당하는 하중을 보행자의 보행 간격에 따라 순차적으로 가력하였다.

이때 실제 보행자의 평균 보폭을 고려하여 보행하중의 간격은 75cm로 하였다. 해석에 사용한 1step보행하중은 75kg의 몸무게를 가지는 사람으로 가정하였고, 보행하중의 진동수는 1.6~2.5Hz 사이에 주로 분포되지만 슬래브에 작용하는 보행자 하중의 진동수는 정확히 예상할 수 없으므로 본 연구에서는 2Hz의 진동수를 가지는 보행하중을 사용하였다. 또한 보행하중의 특성상 바닥판에서 두 발이 동시에 바닥에 닿는 시간간격을 중복시켜 각 절점에 작용시킴으로써, 사람이 보행하는 경우 왼발과 오른발의 영향을 고려하도록 하였다. 보행하중의 1step주기인 0.6초에 대하여 중복되는 시간 간격은 0.1초를 사용하였다.

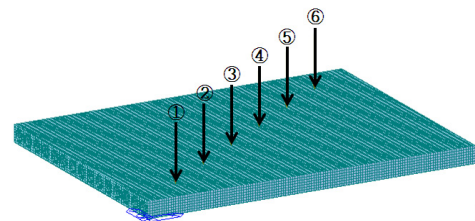


그림 1 보행하중의 적용

표 1 예제 중공슬래브의 제원

산출내역 모델	중공관 지름 (mm)	중공관 중심간 거리 (mm)	중공비 (%)	자중 (kN/slab)
Slab-0	-	-	-	65.39
Slab-A	60	210	6.4	60.72
Slab-B	90		14.4	52.05
Slab-C	120		25.6	37.18
Slab-D	150		40.1	12.97

3.3 처짐비식을 이용한 등가플레이트

일방향 중공슬래브의 등가질량은 중공형성체의 부피와 단위 슬래브와의 부피를 이용하여 산출한다. 단위 슬래브에서 THP주름관이 차지하는 중공부를 제외한 남아있는 부피를 이용하여 속이 꽉 찬 슬래브의 밀도에 대응하는 중공슬래브의 밀도를 구하는 방법으로, 산출한 등가질량은 Material

Data에서 User Defined의 Weight Density에 입력한다.

등가강성은 동일한 힘이 가해질 때 변위는 강성에 반비례하는 후의법칙을 이용하여 산출한다. 이를 위하여 3차원 입체요소를 이용하여 단위슬래브를 모형화한 후, 두 슬래브에 동일한 등분포 하중을 가한 후 슬래브 중앙 하단부의 변위를 구한다. 일반슬래브에 대한 중공슬래브의 변위비는 휨강성비율과 반비례 관계에 있게 되므로 변위비를 이용하여 등가강성을 구할 수 있다. 이때 등가강성은 등가 플레이트요소를 모델링할때 Material Data에서 User Defined의 Modulus of Elasticity에서 입력한다.

기존의 일방향 중공슬래브를 해석할 때 사용하는 처짐비를 이용한 등가강성 산출법은 비교적 해석결과가 정확하고 효율적인 모형화가 가능하다는 연구결과가 있다. 하지만 처짐을 구하기 위해서 3차원 입체요소로 먼저 모델링해야 하는 번거로움이 따른다.

3.4 직교이방성판식을 이용한 등가플레이트

일방향이 중공을 가지는 중공슬래브는 직교하는 x축과 y축의 강성이 현저하게 다른 이방성판의 특성을 가지고 있다. 직교이방성판이란 판의 면에 서로 수직인 두 방향의 탄성 성질이 다른 판을 의미한다. Huber의 직교이방성판 이론식에 근거하여 본 연구에서는 다음과 같이 제안하였다.

$$D_x = \frac{EI}{a(1-\nu^2)} \quad (1)$$

$$D_y = \frac{E(t-d)^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

여기서, t 는 슬래브의 두께, a 는 중공판 중심간의 거리, d 는 중공판의 지름을 나타낸다. 그리고 중공이 있는 단면의 전단강성을 고려하기 위하여 식 (3)과 식 (4)와 같은 Weber와 Foepppl의 직교이방성판의 유효 비틀림 강성을 이용하였다.

$$H_i = \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

$$H_r = \frac{Gh_1t_2^3}{6a} \quad (4)$$

여기서, H_i 는 등방성 강판의 유효비틀림 강성이고 H_r 은 a 간격으로 배치된 리브의 단위길이당 유효 비틀림 강성이다. 강판의 강성과 리브의 강성의 합으로 구한 직교이방성판의 유효 비틀림 강성은 일반슬래브에 대한 감소율 만큼 전단강성이 감소한다고 판단하여 그 비를 산출하였다. 등가 플레이트

요소로 모형화할때는 산출한 D_x , D_y , H 를 일반슬래브를 기준으로 감소한 비율만큼 탄성계수를 계산하고, Material Data의 Orthotropic Type에서 User Defined의 Modulus of Elasticity에서 각각의 모형화 방향에 맞게 계산한 E_x , E_y 및 전단탄성계수를 입력한다.

4. 등가플레이트 모형화에 따른 동적해석

4.1 고유진동수 분석

모형화 방법에 따른 예제 중공슬래브의 1차모드 고유진동수를 표 2에 나타내었다.

비교적 정해라 할 수 있는 3차원 모형화의 고유진동수를 보면, 중공이 없는 Slab-0을 기준으로 Slab-A, Slab-B, Slab-C는 고유진동수가 증가했고 Slab-D는 감소한 것을 볼 수 있다. 특히 Slab-C는 Slab-0과 비슷한 고유진동수를 나타내는데, 이는 강성에 비례하고 질량에 반비례하는 고유진동수의 특성상 중공비에 따라 질량과 강성의 감소 영향이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 즉 Slab-A, Slab-B는 강성 감소의 영향보다 질량 감소의 영향이 상대적으로 커서 고유진동수가 일반슬래브에 비해 높은 것으로 판단된다. Slab-C는 질량과 강성의 감소영향이 비슷하고 Slab-D에서는 질량 감소의 영향보다 강성의 감소의 영향이 상대적으로 더 커서 고유진동수가 낮아지는 것으로 생각된다.

Slab-A의 고유진동수를 비교해 보면, 처짐비식을 이용하여 모델링했을 때는 1.01%, 직교이방성판식을 이용하여 모델링했을 때 오차율이 -0.78%로 나타났다. Slab-B에서는 두 방법모두 2%내외의 오차율을 보이고 있고, Slab-C에서는 처짐비식이 0.49%, 직교이방성판식이 -2.14%을 보이고 있다. 모형화 방법별 고유진동수의 오차율을 비교해 보면, 처짐비식을 이용한 모형화가 좀더 정확한 것을 알 수 있다. Slab-D에서는 처짐비식이 -1.52%, 직교이방성판식이 -6.26%의 오차율을 보이고 있다. 중공비가 40%인 Slab-D에서 오차율이 크게 난 것은 일정한 중공비를 임계점으로 처짐이 급격히 증가하는 일방향 중공슬래브의 영향을 이론식이 적절히 반영

표 2 모형화 방법에 따른 1차모드 고유진동수

산출내역 모델	3차원	처짐비식	직교이방성판식
Slab-0	84.130	83.792	83.792
Slab-A	85.438	84.574	86.111
Slab-B	87.526	85.511	85.019
Slab-C	84.347	83.931	86.153
Slab-D	79.222	80.423	84.182

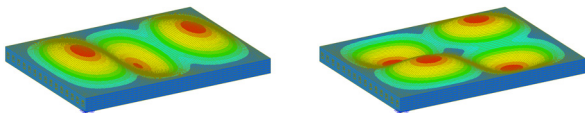
하지 못한 것으로 판단된다.

4.2 고유모드형상 분석

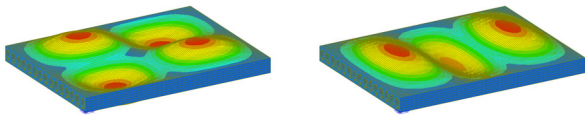
3차원 입체요소 모델의 10차까지의 고유모드형상을 비교해보면 중공비가 커짐에 따라 중공체의 직각방향(단변방향)으로 강성이 약해지는 특성을 뚜렷이 확인할 수 있었고, 등가 플레이트로 모형화 할때는 이를 고려해야할 것으로 판단된다.

그림 2와 그림 3은 각각 Slab-A와 Slab-C의 3차원 입체요소 모델의 4차, 5차 고유모드형상을 나타낸 것으로, 중공비가 큰 모델에서 고유모드형상의 역전형상을 확인할 수 있다.

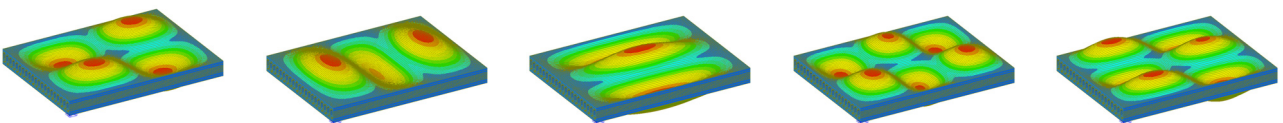
그림 4~그림 6은 Slab-D모델의 4차에서 8차까지의 고유모드형상을 나타낸 것이다. 모형화 방법별 고유모드형상을 비교해 보면 저차모드에서는 처짐비식과 직교이방성판식을 이용한 모델의 고유모드형상이 일치하지만, 고차모드에서는



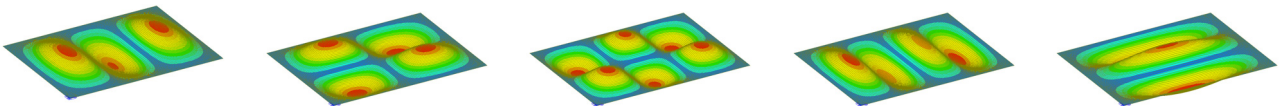
(a) 4차 모드 (b) 5차 모드
그림 2 Slab-A의 3차원 입체요소 모델



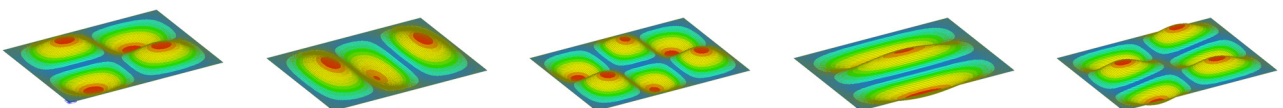
(a) 4차 모드 (b) 5차 모드
그림 3 Slab-C의 3차원 입체요소 모델의 고유모드형상



(a) 4차 모드 (b) 5차 모드 (c) 6차 모드 (d) 7차 모드 (e) 8차 모드
그림 4 3차원 입체요소로 모형화한 Slab-D 모델의 고유모드형상



(a) 4차 모드 (b) 5차 모드 (c) 6차 모드 (d) 7차 모드 (e) 8차 모드
그림 5 처짐비식으로 모형화한 Slab-D 모델의 고유모드형상



(a) 4차 모드 (b) 5차 모드 (c) 6차 모드 (d) 7차 모드 (e) 8차 모드
그림 6 직교이방성판식으로 모형화한 Slab-D 모델의 고유모드형상

처짐비식보다 직교이방성판식을 이용한 모델의 고유모드형상이 3차원 입체요소 모델의 고유모드형상과 비교적 일치하는 것을 볼 수 있다.

고유진동수의 오차가 비교적 작은 처짐비를 이용하여 등가 플레이트로 모형화한 Slab-A에서 Slab-E까지 모든 예제 슬래브의 고유모드형상이 중공이 없는 일반슬래브의 고유모드형상과 동일한 것을 알 수 있다. 이는 처짐비를 이용하여 등가강성을 산출할 때 일방향 중공슬래브의 장변과 단변방향의 직교하는 이방성의 특성을 고려하지 못하기 때문인 것으로 보여진다. 즉, 처짐비를 이용하여 산출한 등가강성은 예제 슬래브를 등방성의 판으로 모형화하게 되므로, 이방성의 특성이 무시되어 중공이 없는 일반슬래브의 고유모드형상과 같게 나온 것이다.

4.3 보행하중에 대한 진동해석

일방향 중공슬래브의 모형화에 대한 진동해석을 하기위해 보행하중에 대한 시간이력해석을 수행한 후 슬래브별 수직방향 응답을 구하였다. 예제 구조물의 응답 측정점은 슬래브 하부의 중앙점으로, 변위와 가속도 응답을 분석하였다.

4.3.1 변위응답분석

그림 7~그림 10은 모형화방법에 따른 예제슬래브의 하부 중앙의 변위응답을 나타낸 것이다. 중공비가 비교적 작은 Slab-A에서는 처짐비식을 이용한 모델과 이방성판식을 이용한 모델의 변위차가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

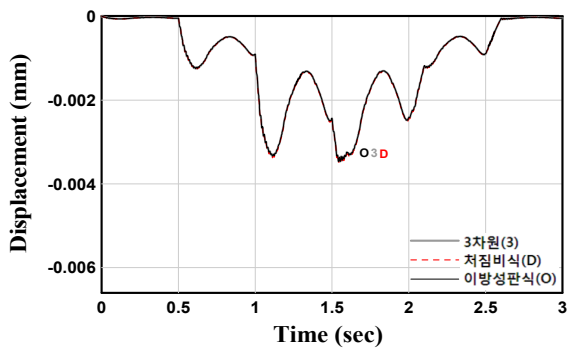


그림 7 모형화 방법에 따른 Slab-A의 변위응답

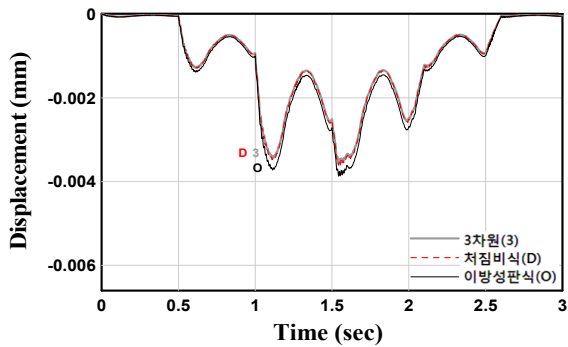


그림 8 모형화 방법에 따른 Slab-B의 변위응답

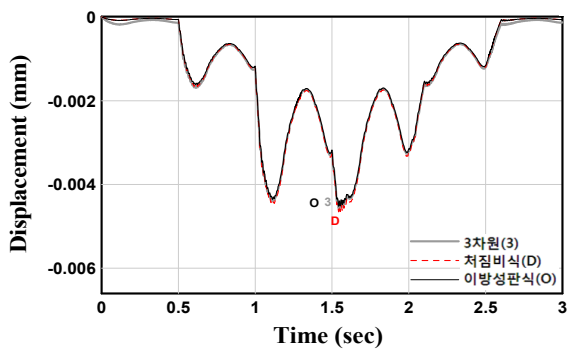


그림 9 모형화 방법에 따른 Slab-C의 변위응답

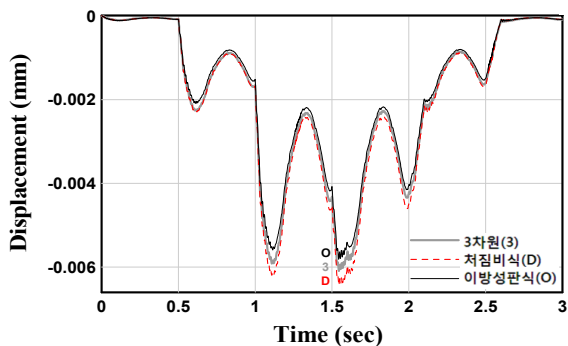


그림 10 모형화 방법에 따른 Slab-D의 변위응답

중공비가 비교적 큰 Slab-C와 Slab-D에서는 처짐비식을 이용한 모델의 변위차가 증가하는 것을 볼 수 있지만, 오차는 비교적 적게 나타나고 있다. 따라서 두가지의 모형화 방

법 모두 3차원 모델의 변위응답과 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 모형화 방법에 따른 최대변위응답을 나타낸 것이다. 중공비에 상관없이 대부분의 모델에서 직교이방성판식을 이용한 모델의 오차율이 더 작게 나타나고 있다. 특히 오차율이 가장 크게 발생한 Slab-D의 오차율을 살펴보면, 처짐비식을 이용한 모델의 오차율이 5.64%, 직교이방성판식으로 이용한 모델의 오차율은 -4.61%로 나타나 직교이방성판식이 좀더 정확한 것을 알 수 있다.

표 3 보행하중에 대한 모형화 방법별 최대변위응답

산출내역 모델	3차원 (mm)	처짐비식 (mm)	직교이방성판식 (mm)
Slab-0	3.341×10^{-3}	3.365×10^{-3}	3.365×10^{-3}
Slab-A	3.467×10^{-3}	3.505×10^{-3}	3.465×10^{-3}
Slab-B	3.564×10^{-3}	3.610×10^{-3}	3.869×10^{-3}
Slab-C	4.571×10^{-3}	4.654×10^{-3}	4.521×10^{-3}
Slab-D	6.091×10^{-3}	6.435×10^{-3}	5.810×10^{-3}

표 4는 모형화 방법에 따른 RMS변위응답을 나타낸 것이다. RMS변위응답에서 처짐비식을 이용한 모형화의 최대 오차율은 4.96% 이방성판식을 이용한 모형화는 8.34%로 처짐비를 이용한 모형화 방법이 조금 더 정확한 것으로 나타났다. 하지만 대체적으로 두가지 모형화 방법 모두 오차율이 작게 나오는 것을 볼 수 있다.

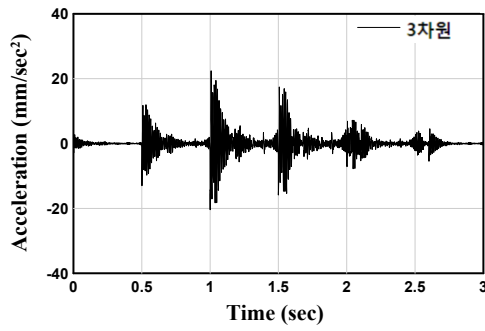
표 4 보행하중에 대한 모형화 방법별 RMS변위응답

산출내역 모델	3차원 (mm)	처짐비식 (mm)	직교이방성판식 (mm)
Slab-0	1.416×10^{-3}	1.426×10^{-3}	1.426×10^{-3}
Slab-A	1.471×10^{-3}	1.486×10^{-3}	1.471×10^{-3}
Slab-B	1.513×10^{-3}	1.532×10^{-3}	1.640×10^{-3}
Slab-C	1.948×10^{-3}	1.973×10^{-3}	1.918×10^{-3}
Slab-D	2.603×10^{-3}	2.732×10^{-3}	2.464×10^{-3}

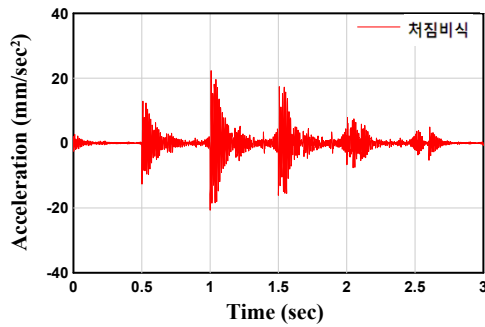
4.3.2 가속도응답분석

중공비가 비교적 작은 Slab-A와 중공비가 비교적 큰 Slab-C의 모형화 방법에 따른 하부중양의 수직방향 가속도 응답 시간이력은 그림 11, 그림 12와 같다. 두가지 방법의 모형화 방법 모두 비교적 정해라고 할 수 있는 3차원 입체요소 모형화 방법과 비슷한 가속도 응답을 보이는 것을 볼 수 있다.

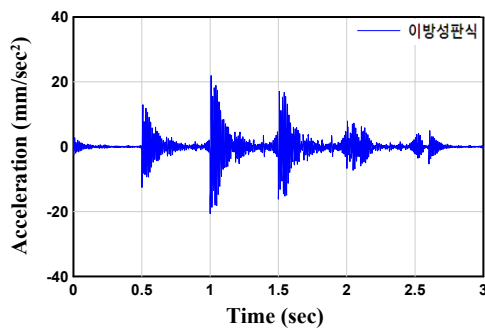
모형화 방법별로 최대가속도응답을 표 5에 나타내었다. Slab-A와 Slab-B에서는 처짐비식을 이용한 모형화 방법이 직교이방성판식을 이용한 모형화 방법보다 오차가 더 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 중공비가 커질수록 처짐비는 오차가 증가하는 것에 비해 직교이방성판식은 중공비에 따른 오



(a) 3차원 입체요소 모형화

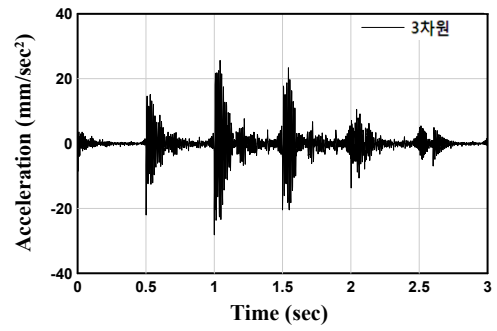


(b) 처짐비식을 이용한 모형화

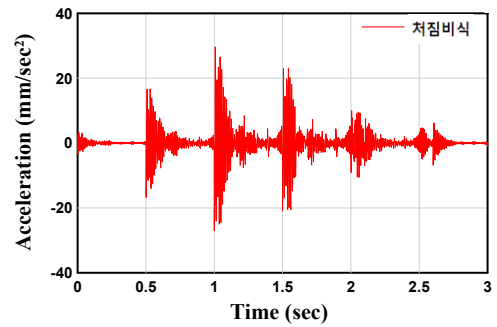


(c) 이방성판식을 이용한 모형화

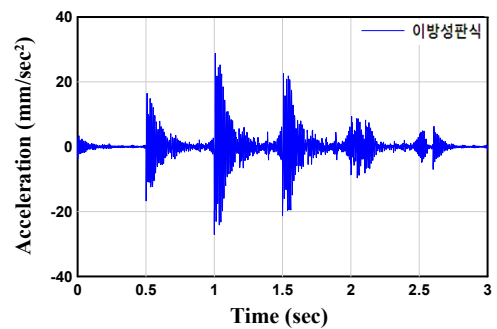
그림 11 모형화 방법에 따른 Slab-A의 변위응답



(a) 3차원 입체요소 모형화



(b) 처짐비식을 이용한 모형화



(c) 이방성판식을 이용한 모형화

그림 12 모형화 방법에 따른 Slab-A의 변위응답

표 5 보행하중에 대한 모형화 방법별 최대가속도응답

산출내역 모델	3차원 (mm/sec ²)	처짐비식 (mm/sec ²)	직교이방성판식 (mm/sec ²)
Slab-0	21.300	21.373	21.373
Slab-A	22.445	22.325	21.944
Slab-B	23.204	22.034	24.652
Slab-C	28.152	29.642	28.819
Slab-D	34.172	36.420	34.492

표 6 보행하중에 대한 모형화 방법별 최대가속도응답

산출내역 모델	3차원 (mm/sec ²)	처짐비식 (mm/sec ²)	직교이방성판식 (mm/sec ²)
Slab-0	2.948	2.974	2.974
Slab-A	3.157	3.201	3.189
Slab-B	3.289	3.330	3.486
Slab-C	4.010	4.168	4.158
Slab-D	5.207	5.519	5.117

차의 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

RMS가속도응답을 표 6에 나타내었다. 최대가속도응답과 마찬가지로 두가지 모형화 방법 모두 오차가 비교적 적은 것을 알 수 있다. RMS가속도응답 역시 중공비가 작을때는 처짐비를 이용한 모형화 방법이 더 정확하지만, 중공비가 커질수록 직교이방성판식이 더 정확하게 나타났다. 이는 중공비에 따라 달라지는 직교하는 강성의 차이를 처짐비를 이용한 모델이 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

각기 다른 중공비를 가진 일방향 예제 중공슬래브를 처짐비식과 직교이방성판식을 이용하여 등가플레이트로 모형화하였고, 비교적 정해라 할 수 있는 3차원 입체요소와의 진동수 및 고유모드형상, 보행하중에 대한 시간이력해석을 비교하여

다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Slab-A에서 Slab-D까지 4가지의 예제 중공슬래브에 대해서 지배적인 영향을 미치는 1차모드의 고유진동수를 비교해 본 결과, 처짐비를 이용한 모형화 방법의 평균 오차율이 -1.06%로 가장 적게 나왔고, 직교이방성판식을 이용한 모형화 방법이 평균 2.00%의 오차율을 나타내었다.

고유모드형상을 비교해 본 결과, 처짐비를 이용하여 등가플레이트로 모형화했을 때는 일방향 중공슬래브의 직교이방성판의 특성을 전혀 나타내지 못하고 중공이 없는 일반슬래브에 등방성판의 특성이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그에 비해 직교이방성판식은 장변방향과 단변방향의 강성을 다르게 산출하고 있어 일방향 중공슬래브의 특성을 표현하는데 적합하다고 판단된다.

보행하중에 대한 변위응답 및 가속도응답에서 중공비가 작을 때는 처짐비를 이용한 모형화 방법이 직교이방성판식을 이용한 모형화 방법보다 오차율이 작게 나타났다. 하지만 중공비가 커질수록 처짐비를 이용한 모형화 방법은 오차율이 증가하는 것에 비해 직교이방성판식은 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있었다.

따라서, 일방향 중공슬래브 시스템의 구조적 특성과 해석 결과의 오차 및 난이도를 고려해 볼 때, 본 논문에서 사용한 직교이방성판식을 이용한 등가플레이트 모델이 효율적이면서 만족할만한 정확성을 나타내는 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 다양한 중공형태에 대한 특성과 그에 따른 바닥성능을 평가하고, 중공슬래브 시스템의 실제 구조물의 적용에 관한 실험을 통해 본 논문에서 제안한 해석의 검증과 충격음 및 진동의 감소효과에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2011-0029558).

참 고 문 헌

강주원, 박성무, 김기철 (2008) 충격음 차단성능 향상을 위한 현장타설 콘크리트 슬래브의 중공판 시스템 적용, 대한건축학회논문집 구조계, 24(12), pp.75~82.

김기철, 이동근 (2001) 보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석, 한국지진공학회 논문집, 5(1), pp.21~29.

김기철, 김광만 (2007) 중공슬래브 바닥판의 진동 및 충격음 특성에 관한 실험연구, 대한건축학회논문집 구조계, 23(4), pp.59~69.

김민규, 박현재, 이동근, 황현식, 김현수 (2009) 보행하중에 대한 2방향 중공슬래브의 진동성능 평가, 한국지진공학회 논문집, 13(5), pp.11~21.

박현재 (2009) 이방향 중공슬래브 구조시스템의 지진거동 평가, 석사학위논문, 성균관대학교 대학원.

장재희 (2002) 공동주택 바닥충격음 저감재의 저감효과에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 18(4), pp.205~212.

공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준 (건설교통부 고시 제2009-1217호).

대한건축학회, 건축구조기준 2009 (2010) 기문당.

Ansel C. Ugural (1999) Stresses in Plates and Shells (2nd).

Elliott, G. (1979) Test of a Quarter-scale Reinforced Concrete Voids Slab Bridge, Cement and Concrete Association Technical Report 527.

Elliott, G., Clark, L.A. (1982) Circular Voids Concrete Slab Stiffnesses, *Journal of the Structural Division*, 108(11), pp.2379~2393.

Meesand, P., Vermeir, O. (1993) Structure-Borne Sound Transmission at Elastically Connected Plates, *Journal of Sound and Vibration*, 166(1), pp.55~76.

- 논문접수일 2012년 6월 28일
- 논문심사일 2012년 7월 10일
- 게재확정일 2012년 8월 30일