# 콘크리트 다층바닥판 구조의 구조거동에 관한 해석적 연구

# Study on Structural Behavior of Multi-layered Concrete Floor Structure

유 영 준* 송 하 원** 변 근 주*** 정 성 철****
You, Young-Jun Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo Chung, Sung-Cheol

Abstract

In this paper, the structural behavior of R.C. multi-layered floor structure including foam concrete layer is numerically analyzed. For the analysis, 3D interface element has been implemented to finite element analysis program to consider the interfacial behavior of multi-layered floor structure which consists of rubber layer, foam concrete layer and mortar layer on RC slab. Based on analysis results on multi-layered structure, its structural behavior is analyzed according to geometrical and material properties of foam concrete. Optimum material property of each layer of the floor structure is proposed to get optimum multi-layered concrete structure.

## 1. 서 론

아파트가 고층화됨에 따라 구조물의 중량이 커지고 있으며 이것은 고층화에 부정적인 요소이다. 이것을 해결하기 위한 일환으로 아파트 구조물의 바닥층 위에 단열층 및 보조소음층 재료로 보통콘크리트보다 가벼운 경량콘크리트가 효과적으로 이용될 수 있다. 그러나 기존 바닥층을 구성하는 재료들과의 복합적인 거동이 아직 밝혀진 바 없기에 효과적인 경량콘크리트층의 설계 및 시공이 안되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구를 통하여 도출될 경량콘크리트층을 포함한 슬래브바닥층의 최적의 구성조건은 최적의 다층바닥판을 구성하는데 매우 긴요하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 바닥 철근콘크리트(RC) 슬래브, 고무형 충격소음방지재, 단열층 경량콘크리트(foam concrete), 바닥모르터(mortar)로 이루어진 다층바닥판 구조물에 대한 적절한 구성모델링과 이에 따른 구조해석을 통하여 균열에 대해 지항성을 판단하며 최적의 다층바닥판 구조를 구성하는데 필요한 단열층 경량콘크리트의 소요재료성질 및 제원을 도출하고 연구의 결과로서 최적의 다층바닥판 구성을 제안하는데 그 목적을 둔다.

## 2. 다층바닥판 구조의 모델링

### 2.1 해석 유한요소의 선정 및 감차적분

*정회원, 건설기술원 위촉연구원
**정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수
***정회원, 연세대학교 토목공학과 교수
****정회원, (주)대우, 건축본부 차장

슬래브구조의 유한요소해석은 plate 요소 또는 shell 요소를 이용하는 것이 일반적이지만, 본 연구대상 슬래브는 RC 슬래브, 고무형 충격소음방지재, 경량콘크리트, 모르터 네 개 층으로 이루어진 복합구조이기 때문에 이러한 복합구조의 거동과 각 층 경계면에서의 거동을 구명하기 위하여 경계면요소와 solid 요소를 사용하였다. 본 연구에서는 solid 요소에서의 최적 적분점 개수를 결정하기 위하여 그림 1과 같은 단순지지 슬래브의 각기 다른 적분점을 사용한 유한요소해석 결과를 엄밀해와 비교함으로써 solid 요소에서의 최적 적분점 수를 결정하였다.[1] 본 해석에 사용한 solid 요소는 8절점 요소이며 먼저 요소의 적분점을 8개(2×2×2)로 설정하여 해석하였다. 요소 분할은 높이방향, 폭방향, 길이방향에 대하여 ① 1등분, 2등분, 10등분, ② 2등분, 4등분, 20등분, ③ 4등분, 8등분, 40등분하여 각각 슬래브를 20개, 160개, 1280개의 요소를 사용하여 해석하였다. 그 다음으로 요소의 적분점 4개(2×1×2)로 감소시켜 감차적분을 실시하였으며 부재 높이방향으로 1등분, 폭방향으로 2등분, 길이방향으로 10등분하여 해석하였으며, 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 보듯이 적분점을 일반적인 8개로 설정하여 유한요소해석을 실시하면 요소 수를 크게 증가시킨 1280개의 요소를 이용해도 엄밀해와는 차이가 크며, 적분점을 4개로 감차적분을 수행하면 20개의 요소만을 사용해도 엄밀해와 근접한 결과를 얻음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 다층바닥판의 모델링에는 solid 요소에 감차적분(2×1×2)을 사용하였다.

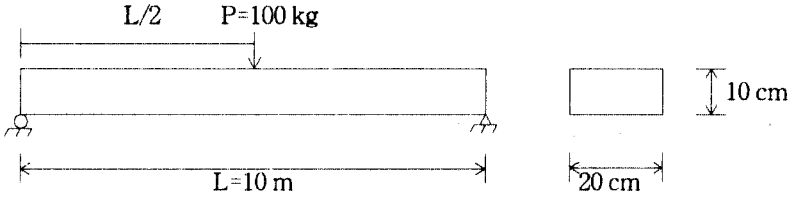



그림 1 단순지지 슬래브

표 1 단순지지 슬래브 유한요소해석 결과

| 방법 | 적분점수 | 요소수 | 위치 | 응력(kg/cm$^2$) | 변형률($\times 10^{-6}$) | 수직변위(cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| F E M | 8 | 20 | 상연 | -1.604 | -7.064 | |
| | | | 하연 | 1.594 | 7.088 | -0.1311 |
| | | 160 | 상연 | -6.205 | -27.940 | |
| | | | 하연 | 6.186 | 27.980 | -0.4907 |
| | | 1280 | 상연 | -20.080 | -91.350 | |
| | | | 하연 | 20.040 | 91.420 | -1.5630 |
| | 4 | 20 | 상연 | -67.500 | -298.300 | |
| | | | 하연 | 67.500 | 298.300 | -5.4700 |
| 엄밀해 | | | 상연 | -75.000 | | |
| | | | 하연 | 75.000 | | -5.7505 |

## 2.2 바닥판 모델링 및 경계면 거동

해석대상 바닥판은 그림 2와 같이 다층으로 이루어져 있으며 각 층의 재료특성이 서로 다르기 때문에 각 층의 거동을 고려하여 전체 거동을 해석하여야 한다. 층과 층사이는 구성재료의 특성에 따라 완전접착 여부가 결정되고 완전하게 접착되어 있지 않을 경우 그 경계면의 특성을 고려하기 때문에 그림 3과 같이 각 층 사이에 경계면 요소를 사용하였고, 고무형 충격소음방지재 층이 RC 슬래브 위에 놓이는 경우에는 슬래브층이 완전경화된 후 설치되기 때문에 두 층은 완전히 접착되지 않으며, 그 나머지 층들은 일체거동을 한다. 경량콘크리트층 위에 고무형 충격소음방지재가 놓이는 경우는 RC 슬래브와

경량콘크리트, 고무형 충격소음방지재와 모르터층은 일체로 거동하며, 경화된 경량콘크리트층 위에 고무형 충격소음방지재가 놓이므로 이들 층간에는 완전한 접착이 이루어지지 않는 것으로 모델링하였다.

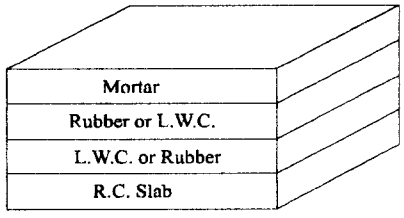



그림 2 해석 대상 슬래브의 구조

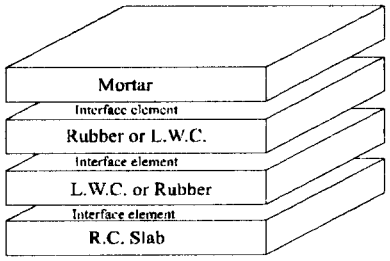
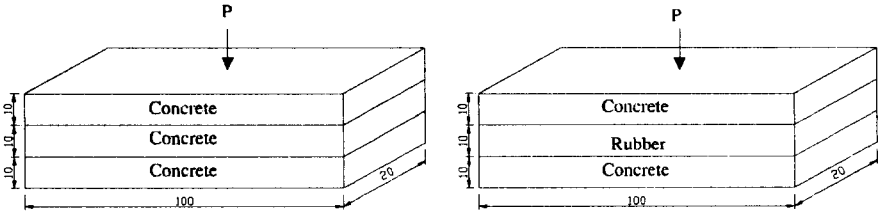



그림 3 다층바닥판의 해석 개념도

층의 구성은 아래부터 RC 슬래브, 고무형 충격소음방지재, 경량콘크리트, 모르터 순이나 고무형 충격소음방지재가 없는 경우와 이 층과 경량콘크리트 층의 순서가 바뀐 경우도 해석하였다. 바닥판 총 두께는 250㎜로서 각 층의 두께를 달리하여 case를 나누었다. RC 슬래브는 120㎜(A, B case), 135㎜(C, D case), 150㎜(E, F case), 고무형 충격소음방지재 층은 20㎜이며, 모르터층은 45㎜(A, C, E case)와 50㎜(B, D, F case)이며 그 나머지에 해당하는 두께가 경량콘크리트층의 두께이다. 또한 각 case에 대해 경량콘크리트의 압축강도가 10kg/㎠, 15kg/㎠, 20kg/㎠ 일 때 해석을 실시하였다.

경계조건은 아파트의 슬래브 구속상태와 동일하게 하기 위해 길이가 짧은 한 변은 지지하지 않고 나머지 변은 모두 고정시켰으며 슬래브 위의 층들은 슬래브에 비해 상대적으로 고정상태가 불완전하기 때문에 단순히 올려져 있는 것으로 해석하였다. 하중은 등분포의 자중과 600kg/㎡의 등분포활하중에 대한 거동을 해석하였으며, 집중하중의 경우는 동하중임을 감안하여 작압자 체중의 2배에 1.7배(100kg×2배×1.7)를 가정한 약 350 kg의 하중이 작업화 면적(10cm×10cm)에 작용할 때의 거동을 해석하였다.

구조물이 다음 그림 4와 같이 층으로 구성되어 있을 경우 층과 층 사이의 구조물 거동을 증명하기 위하여 하중에 의한 변형률을 조사한다. 그림 4의 (a)는 각 층이 동일한 재료로 이루어진 구조물이고 (b)는 중간층에 강성이 낮은 재료가 들어간 구조물이다.

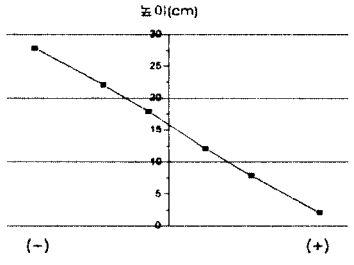



(a) 다층균질재료 (b) 다층이질재료

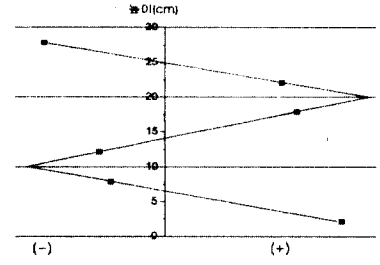
그림 4 층과 층 사이의 거동

구조물을 단순지지 상태에서 하중을 가하여 층과 층사이를 완전한 결합으로 한 경우와 층과 층사이의 미끄러짐을 허용한 경우 적분점에서의 변형률을 그려보면 그림 5의 (a-1), (b-1)과 (a-2), (b-2)와 같다. 그림 5에서 (a-1)과 (b-1)은 층 사이의 결합을 완전접착으로 하였을 경우이고 (a-2)와 (b-2)는 완전접착이 아닌 임의의 아주 작은 결속력을 갖도록 하여 그린 것이다. (a-1)과 (b-1)의 완전접착일 경우에 각 층의 변형률이 층과 층사이에서 동일한 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 층과 층 사이의 완전접착으로 같은 점에서 동일한 변형률 값이 전달되는 것을 의미하고, (a-2)과 (b-2)의 완전접착이 아

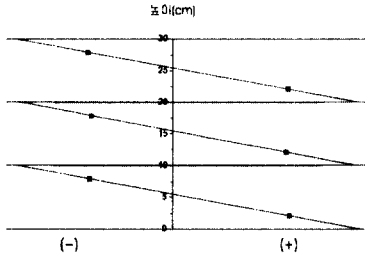
닐 경우에 각 층에서 변형률 차이가 발생하였음을 알 수 있다. 이것은 층과 층 사이가 경계면 요소에 의해 미끄러짐이 허용된 이유이다. 또한, (b-1)과 (b-2)는 양쪽의 층에 비하여 상대적으로 강성이 작은 고무 재료에 대해 해석한 경우로서 (b-1)의 경우 그 형상이 (a-1)과 다름을 볼 수 있는데 이것은 중간 층이 상대적으로 강성이 작기 때문에 중간층 상하층의 거동에 영향을 미침을 알 수 있다.



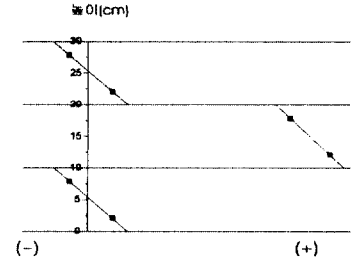

(a-1)
완전접착 다층균질체의 변형률




(b-1)
완전접착 다층이질체의 변형률




(a-2)
미찰경계조건을 고려한 다층균질체의 변형률




(b-2)
마찰경계조건을 고려한 다층이질체의 변형률

그림 5 변형률 분포도

## 2.3 구조해석 및 결과

본 다층바닥판은 삼변이 고정되어 있으므로 삼변에서는 부모멘트가 발생하여 다층바닥판의 상부 지지변에서 인장, 하부에서 압축이 발생하며 중앙점에서는 상부에서 압축, 하부에서 인장이 발생하게 된다. 최대인장응력이 발생하는 곳은 자유단의 중앙부가 되며 그 곳에서 최대처짐이 발생한다.

먼저 두께에 따른 경량콘크리트 층의 응력변화를 살펴보면 그림 6에서 슬래브의 두께(A-B case : 15cm, C-D case : 13.5cm, E-F case : 12cm)가 다른 경우에는 바닥판의 구조거동에 있어서 경량콘크리트 층의 두께 변화보다 슬래브 층의 두께 변화가 더 지배적임을 알 수 있으며, 슬래브의 두께가 감소할수록 경량콘크리트 층이 받는 인장응력이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 경량콘크리트의 압축강도가 클수록 인장응력이 크게 발생하였음을 알 수 있다. 모르터 층의 응력변화는 그림 7에서 보는 바와 같이 경량콘크리트 층 거동과 마찬가지로 슬래브의 두께가 두꺼워질수록 모르터 층에 발생하는 인장응력이 커지지만, 경량콘크리트의 강도가 높아질수록 모르터 층의 인장응력은 작아짐을 알 수 있다. 이것은 경량콘크리트의 강도가 클수록 경량콘크리트 층에서 하중이 더 많이 분배되기 때문에 상대적으로 모르터 층에서 부담해야 하는 인장응력이 감소하는 것으로 판단된다. 그리고 슬래브두께가 같은 경우(A-B case, C-D case, E-F case) 경량콘크리트 층의 두께가 두꺼울수록 경량콘크리트 층에서는 인장응력이 커지고 모르터 층에서는 인장응력이 작아짐을 알 수 있다. 이는 모르터 층의 두께가 두꺼

워져서 모르터의 자중증가로 인해 인장응력이 커지기 때문으로 판단된다.

고무형 충격소음방지재의 설치여부에 따른 결과를 그림 8과 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 최대 인장응력과 최대인장변형률 모두 고무형 충격소음방지재 층이 없는 경우 더 작은 값을 나타냈다.

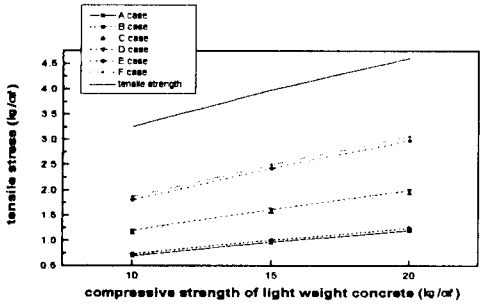



그림 6 경량콘크리트층에서의 인장응력

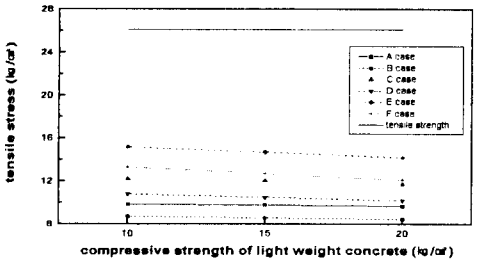



그림 7 모르터층에서의 인장응력

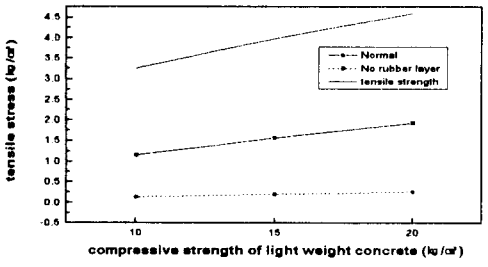



그림 8 충격소음방지재의 설치여부에 따른 경량콘크리트층의 응력 변화

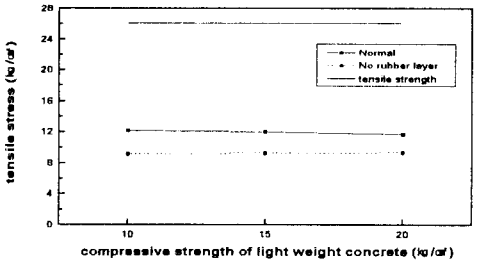



그림 9 충격소음방지재의 설치여부에 따른 모르터층의 응력 변화

## 2.4 경량콘크리트 타설 후 집중하중에 대한 거동

경량콘크리트 타설 후 작업자하중에 의한 거동을 알아보기 위하여 C case에 대해 경량콘크리트의 28일 강도 10 kg/㎠에 대하여 자유단으로부터 40 cm떨어진 곳에 작업화를 10 cm×10 cm로 모델링하여 600 kg의 하중을 가하여 해석을 실시한 결과 경량콘크리트층에서 최대인장응력은 장변방향 단부 중앙 상부에서 부모멘트에 의해 0.09733 kg/㎠가 발생하였다.

경량기포콘크리트의 재령 7일과 28일 강도 사이의 관계를 이용하여 재령 $t$에 따른 경량콘크리트의 압축강도에 대한 최적곡선을 구하면 식(1)과 같고, 이와 경량기포콘크리트의 할렬인장강도 식을 이용하여 재령에 따른 경량콘크리트의 인장강도를 그림 10에 도시하였다.[2] 발생한 인장응력은 경량콘크리트의 초기재령 인장강도보다 작으므로 경량콘크리트 타설 후 기본적인 양생기간을 거치면 작업자에 의한 집중하중에 대해 인장균열은 발생하지 않을 것으로 사료된다. 또한, 지압강도 발현에 소요되는 날짜를 계산하기 위하여 충격을 고려한 작업자에 의한 집중하중을 200 kg으로 고려하고, 활하중에 대한 하중계수를 1.7을 곱하여 구한 작업자 하중 350 kg이 작업화(10cm×10cm)에 작용할 때 작업자에 의한 지압응력을 검토하기 위하여 ACI에서 제안하는 식(2)를 사용한다.[3]

$$\sigma_c(t) = 10.376(1-e^{-0.119\,t}) \qquad (1)$$

$$\sigma_b = \phi_b\, 0.85\sigma_{ck}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}, \quad \sqrt{A_2/A_1} \le 2 \qquad (2)$$

여기서, $\sigma_b$ : 지압강도, $\phi_b$ : 강도감소계수 (=0.7), $A_1$ : 하중재하면적, $A_2$ : 하중재하지점 아래의 응력증가면적이다. 식(2)에 따라 압축강도 10 kg/㎠인 재령 28일의 경량콘크리트에 대한 지압강도를 계산하면 11.9 kg/㎠이며 지압응력 3.5 kg/㎠보다 크므로 지압응력에 의한 문제는 발생하지 않는다. 식(1)과 식(2)를 이용하여 재령에 따른 지압강도를 도시하면 그림 11과 같으며 지압응력 3.5 kg/㎠이상의 지압강도가 발현되기 위한 압축강도는 2.941 kg/㎠이며, 이를 위해서는 3일 이상의 양생이 필요하다.

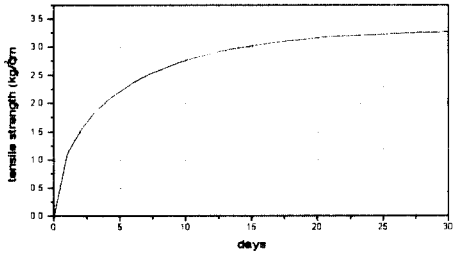



그림 10 재령에 따른 경량콘크리트의 인장강도

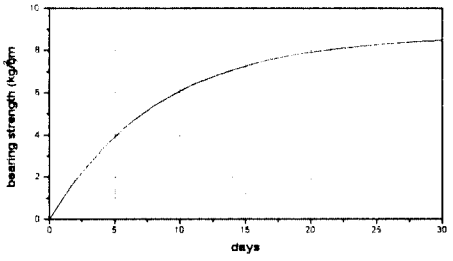



그림 11 재령에 따른 경량콘크리트의 지압강도

이상의 결과에서 볼 수 있듯이 압축강도 10kg/㎠인 재령 28일의 경량콘크리트층은 펀칭 전단에 대해 안전하다. 그림 12는 식(1)을 이용하여 재령에 따른 경량콘크리트의 펀칭전단강도를 도시한 것이다. 발생하는 펀칭전단응력 1.914kg/㎠의 펀칭전단강도를 확보하기 위한 압축강도는 3.028kg/㎠이며, 이를 위해서는 경량콘크리트에 대해 최소 3일의 양생기간이 요구된다.

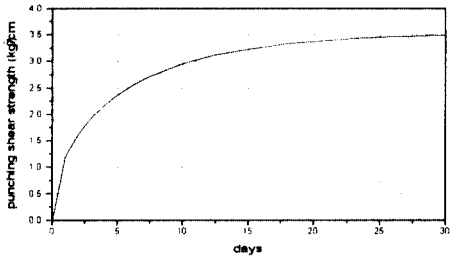



그림 12 재령에 따른 경량콘크리트의 펀칭전단강도

## 3. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 제공된 설계조건하에서 다층바닥판의 경량콘크리트가 충분히 경화하여 압축강도가 완전히 발현된 경우 설계하중에 의해 발생하는 인장응력은 경량콘크리트의 인장강도의 60%정도이었다.

2) 경량콘크리트층의 압축강도가 10 kg/㎠인 경우에는 경량콘크리트의 타설 후 3일 이상의 양생기간이 경과하여 압축강도의 발현이 3.028 kg/㎠에 도달한 이후에 후속작업이 가능하다.

3) 다층바닥판의 모르터층과 경량콘크리트층의 거동은 주로 RC 슬래브의 두께에 의해 지배된다. 슬래브의 두께가 두꺼울수록 모르터와 경량기포 콘크리트층의 인장응력이 감소한다.

## 참고문헌


1. Yang, T. Y. (1986), ***Finite Element Structural Analysis***, Prentice Hall.
2. 건설교통부(1997), ***고분자기포제를 이용한 경량기포 콘크리트의 개발***, 건교부과제.
3. American Concrete Institute(1995), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-95) and Commentary(ACI318R-95).
4. 건설교통부(1996), 콘크리트표준시방서.