

# 시공 계획을 고려한 플랫 플레이트 최소 두께

## Minimum Thickness Requirements of Flat Plate Considering Construction Scheme

강 성 훈<sup>\*</sup>      최 경 규<sup>\*\*</sup>      박 흥 근<sup>\*\*\*</sup>  
Sung-Hoon Kang    Kyoung-Kyu Choi    Hong-Gun Park

### ABSTRACT

It is common in multistory flat-plate structures that newly cast slabs are supported by a number of previously cast floors. Then the weight of newly cast slabs is imposed on shored previously cast floors as load, and this load may be large as double as dead load. Because early-age construction loads cause large immediate deflection and creep deflection with cracks, this loads influence long-term behavior of slabs.

In current provision, the minimum thickness is required to satisfy serviceability. But this minimum thickness based on historical precedent is determined by span length, therefore the minimum thickness of current provision can not include properly the effect of construction scheme including the number of shored floors and construction cycle.

In the present study, a minimum thickness criterion, which includes the effect of concrete strength, geometry of slabs and construction scheme, was developed from computer-based iteration using deflection calculation procedure of current code method

### 1. 서론

플랫 플레이트 구조물의 경우 새로 타설되는 슬래브는 지주로 연결된, 이전에 타설된 몇 개층의 슬래브로 지지되는 것이 일반적이다. 이 때 새로 타설되는 슬래브의 자중은 지주를 통해 이전에 타설된 슬래브에 하중으로 작용하게 되는데, 이로 인해 아직 28일 강도를 발휘하지 못한 슬래브에 설계 하중보다 큰 하중이 작용할 수도 있게된다. 이러한 시공 하중은 시공 중 슬래브에 큰 초기 처짐과 크리프 처짐을 유발시켜 슬래브의 장기 거동 및 사용성에 큰 영향을 미치게 된다.

그러나 현행 콘크리트 구조 설계 기준(KCI 기준) 및 ACI 기준에서는 2방향 슬래브의 사용성을 보장하기 위한 최소 두께를 순경간과 철근 강도에 따라 규정하고 있어 시공 계획에 따른 시공 하중, 시공 속도(construction cycle)등의 영향을 반영할 수 없다. 실제 이전 연구 결과<sup>4)</sup>를 보면 현행 설계 기준의 최소 두께는 사용성을 보장하지 못하거나 지나치게 안전측인 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 시공 하중, 시공 속도등의 영향을 반영할 수 있는 최소 두께를 제안하여 설계 단계에서 시공 단계의 시공 계획을 반영할 수 있는 설계 방법을 제안하고자 한다.

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 대학원 박사과정

\*\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

## 2. 시공 하중을 고려한 슬래브의 처짐 계산

### 2.1. 시공 하중

Paul Grundy와 A. Kabaila<sup>2)</sup>는 몇 가지 가정을 통해 시공 하중을 구하는 손쉬운 방법을 개발하였고, K.H. Mosallam과 W.F. Chen<sup>5)</sup>은 이를 수정한 방법을 제안하였다. 그림 1은 K.H. Mosallam과 W.F. Chen의 시공 하중 분배 과정을 나타내고 있으며, 숫자로 표기된 것은 시공 하중의 슬래브 자중에 대한 비율이다.

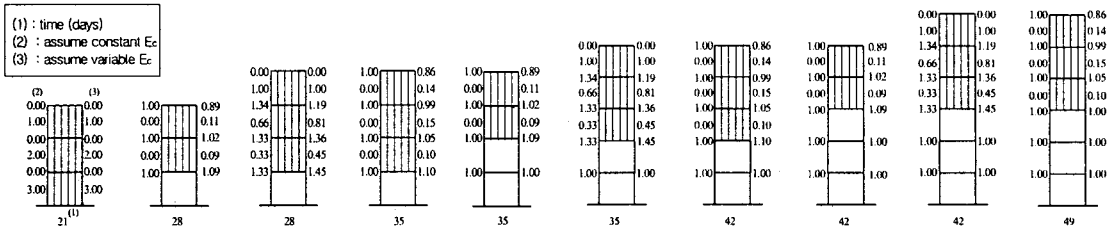


그림 1 시공 하중 분배 과정

### 2.2 슬래브 모델링

슬래브의 처짐은 슬래브의 두께, 지지 및 경계 조건, 철근량, 슬래브의 기하학적 형상, 콘크리트 타설 후 경과 시간등과 같은 여러 변수들에 의하여 지배되므로 정확한 처짐을 계산하기란 쉬운 일이 아니다. 따라서 2방향 슬래브의 처짐을 보 처짐식을 이용하여 구할 수 있도록 2방향 슬래브를 보로 치환하는 몇 가지 근사적 방법이 제안되었다. 본 연구에서는 주열대와 주간대를 연속보로 간주하고 처짐을 계산하는 Rangan<sup>3)</sup>이 제안한 방법을 사용하였다. 직접 설계법등의 설계 방법에 따라 주열대와 주간대의 모멘트가 결정되면 각 스트립의 처짐을 보 처짐식으로 계산하여 중첩시키면 슬래브의 처짐을 구할 수 있다.

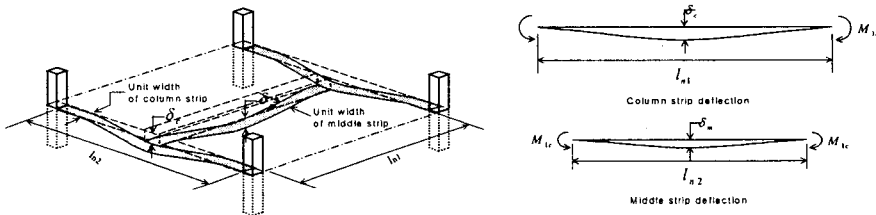


그림 2 2방향 슬래브의 처짐 모델링

### 2.3. 장기 처짐

철근 콘크리트 슬래브는 초기 처짐 외에 시간의 경과와 더불어 장기처짐이 발생한다. 장기 처짐은 온도, 습도, 양생 조건, 재하시의 재령과 함수량, 압축 철근비, 지속 하중의 크기 및 기타 요인들에 의해 영향을 받는다. 규준에서는 초기 처짐에 계수  $\lambda$ 를 곱하여 장기 처짐을 구하거나 크리프 처짐과 건조 수축에 의한 처짐을 각각 구하여 장기 처짐을 구하도록 규정하고 있다.

표 1 은 여러 연구자들과 ACI에서 제안하는 장기 처짐 계수  $\lambda$ 이다.

표 1 장기 처짐 계수

	파괴 계수(MPa)	즉시 처짐 계수	크리프처짐 계수	건조 수축 계수	총 처짐 계수
Sbarounis	$0.6\sqrt{f'_c}$	1.0	2.8	1.2	5.0
Branson	$0.6\sqrt{f'_c}$	1.0	2.0	1.0	4.0
Graham & Scanlon	$0.6\sqrt{f'_c}$ $0.32\sqrt{f'_c}$	1.0 1.0	2.0 1.5	2.0 1.0	5.0 3.5
ACI 318	$0.6\sqrt{f'_c}$	1.0	2.0		3.0

### 3. 최소 두께의 제안

#### 3.1 최소 두께의 유도

시공 하중은 시공 중에만 재하되지만, 슬래브에 균열을 발생시켜 슬래브의 휨강성을 저하시키므로, 시공 완료후에도 처짐에 영향을 미치게 된다. 즉, 지속 하중에 의한 처짐은 시공 하중에 의한 처짐에 시공하중에 대한 지속 하중의 비를 곱하여 구해야한다.

슬래브의 처짐은 각 스트립의 처짐을 보 처짐식을 이용하여 구한 후 중첩시키면 구할 수 있으므로, 지속 하중에 의한 즉시 처짐은 식 (1) 과 같다.

$$\delta_{sus} = \frac{(L.R)_{sus}}{(L.R)_{con}} \times \frac{5}{48} \left[ \frac{l_{n2}^2}{E_c I_{e2}} \{M_{nc} - 0.1(M_{1c} + M_{2c})\} + \frac{l_{n1}^2}{E_c I_{e1}} \{M_{nm} - 0.1(M_{1m} + M_{2m})\} \right] \quad (1)$$

여기서  $\delta_{sus}$ 은 지속 하중에 의한 즉시 처짐 (cm),  $(L.R)_{sus}$ 은 슬래브 자중에 대한 지속 하중의 크기,  $(L.R)_{con}$ 은 슬래브 자중에 대한 시공 하중의 크기,  $l_{n2}$ 는 주열대 순경간( $l_{n1}$ 은 주간대 순경간),  $E_c$ 는 콘크리트 탄성 계수,  $I_{e2}$ 는 주열대 유효 단면 2차 모멘트( $I_{e1}$ 은 주간대 유효 단면 2차 모멘트),  $M_{nc}$ 는 시공 하중에 의한 주열대 정모멘트 ( $M_{nm}$ 은 주간대 정모멘트),  $M_{1c}, M_{2c}$ 는 시공 하중에 의한 주열대 부모멘트 ( $M_{1m}, M_{2m}$ 는 주열대 부모멘트)이다.

직접 설계법에 따라 각 스트립으로 분배되는 모멘트는 경간, 시공 하중의 크기, 슬래브의 두께로 나타낼 수 있고, 장기 처짐은 즉시 처짐에 계수를 곱해 구할 수 있으므로, 플랫 플레이트 내부 패널의 장기 처짐은 식(1)로부터 식(2)와 같이된다.

$$\delta_{inc} = \left[ \frac{5 \times \lambda \times (L.R)_{sus}}{48 E_c} \times 10^{-4} \right] \times \left[ 0.3225 \frac{\alpha_1^4}{(2\beta - 1)\gamma_1} \beta_1^3 + 0.3375 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} \beta_2^3 \right] \frac{l_2}{h^2} \quad (2)$$

여기서,  $\delta_{inc}$ 는 지속 하중에 의한 장기 처짐,  $\lambda$ 는 장기 처짐 계수(표1).  $\gamma_1$ 은 주간대에서,  $\gamma_2$ 는 주열대에서의 단면 2차 모멘트에 대한 유효 단면 2차 모멘트의 비( $\gamma = I_e/I_g$ ),  $\beta$ 는 종횡비(= $l_2/l_1$ ),  $\alpha_1 = l_{n1}/l_1$  ( $\alpha_2 = l_{n2}/l_2$ )이다.

한편, 규준에서는 사용성을 확보하기 위해 허용 처짐에 제한을 두고 있다. 전체 장기 처짐 중에서 비구조 요소가 부착된 후 발생하는 처짐에 대하여 과도한 처짐으로 인해 손상되기 쉬운 비구조 요소를 지지 또는 부착한 지붕 또는 바닥은  $l/480$ , 과도한 처짐에 의해 손상될 염려가 없는 비구조 요소를 지지 또는 부착한 지붕 또는 바닥은  $l/240$ 을 초과하지 못하도록 하고 있다.

플랫 플레이트의 경우 경간에 대한 명확한 규정이 없으므로 본 연구에서는 대각 기둥 사이의 중심간 거리를  $l$ 로 정의하였다.

따라서 식(2)를 허용 처짐보다 작다고 놓고 두께에 대하여 정리하면 식(3)과 같이 플랫 플레이트 내부 패널에 대한 최소 두께식을 구할 수 있다.

$$h_{\min} = A \times \left[ \frac{0.3225 \frac{a_1^4}{\gamma_1} + 0.3375 \beta^3 (2\beta - 1) \frac{a_2^4}{\gamma_2}}{\beta^2 (2\beta - 1) \sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[ \frac{\lambda \times (L.R)_{sus} \times l_n^2}{E_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

여기서,  $A$ 는 허용 처짐이  $\sqrt{l_n^2 + l_n^2}/240$  일 때 0.245, 허용 처짐이  $\sqrt{l_n^2 + l_n^2}/480$  일 때 0.3464이다.

### 3.2. 유효 단면 2차 모멘트의 고려

작용 하중에 의한 모멘트  $M_d$ 가 콘크리트 파괴 계수에 의한 균열 모멘트  $M_{cr}$ 을 초과하면 균열이 발생하고, 단면 2차 모멘트는 균열에 의한 단면 2차 모멘트로 대신된다.

$M_d/M_{cr}$ 의 크기는 각 구간마다 다른 값을 가지며, 모두  $[\sqrt{f_{ck}'(t)}/\{(L.R)_{con} \cdot l_n\}]h$ 의 크기로 나타낼 수 있다. 따라서  $[\sqrt{f_{ck}'(t)}/\{(L.R)_{con} \cdot l_n\}]h$ 의 크기에 따라 균열이 발생하는 위치가 정해지고 유효 단면 2차 모멘트의 비  $\gamma$ 도 결정된다. 여기서,  $f_{ck}'(t)$ 는 하중 재하시의 콘크리트 강도이다.

만약 주간대, 주열대 전단면에 균열이 발생하면  $\gamma$ 를 모두  $[\sqrt{f_{ck}'(t)}/\{(L.R)_{con} \cdot l_n\}]^3 h^3$ 의 크기로 나타낼 수 있게된다. 이를 식(3)에 대입하면 허용 처짐이  $l/240$ 일 때 최소 두께식은 식(4)와 같이 된다.

$$h_{\min} \approx \left\{ (6 \times 10^{-13}) \times \left[ \frac{0.65767 + 2.8753 \times \beta^6 (2\beta - 1)^3}{\beta^5 (2\beta - 1)^3 \sqrt{1 + \beta^2}} \right] \times \left[ \frac{\lambda (L.R)_{sus} (L.R)_{con}^3 a l_n^2}{E_c (\sqrt{f_{ck}'(t)})^3} \right] \right\}^{1/5} \quad (4)$$

$$\approx 0.4317 \times 10^{-2} \times \left[ \frac{\lambda (L.R)_{sus} (L.R)_{con}^3 a l_n^2}{E_c (\sqrt{f_{ck}'(t)})^3} \right]^{1/5}$$

### 3.3 최소 두께의 제안

식(3)에서 평균 유효 단면 2차 모멘트의 비  $\gamma$ 는 슬래브의 두께가 결정되기 전까지는 그 값을 알 수 없으므로 이 식을 이용하여 플랫 플레이트의 최소 두께를 바로 구할 수는 없다. 따라서 반복 계산 과정이 필요한데, 그 과정은 다음과 같다.

1) 슬래브 두께 가정

2)  $[\sqrt{f_{ck}'(t)}/\{(L.R)_{con} \cdot l_n\}]h$ 를 산정하고 그 값의 범위에 따라 평균 유효 단면 2차 모멘트의 비  $\gamma$ 를 구한다.

3) 2)에서 구한  $\gamma$ 를 식(3)에 대입하여 슬래브 최소 두께  $h$ 를 계산한다.

4) 2)에서부터 3)을 반복 수행

다음과 같은 변수들의 일반적인 범위 내에서 컴퓨터를 이용하여 위의 과정을 수행한 결과, 그림 3과 같이 나타났으며, 반복 계산이 필요 없는 플랫 플레이트 내부 패널 최소 두께 근사식을 식 (4)와 그림 3으로부터 식(5), 식(6)와 같이 구하였다. :  $l_n=500\sim 850\text{cm}$  ;  $f_{ck}'(t)=150\sim 350\text{ kgf/cm}^2$  ;  $\beta=1.0\sim 2.0$  ;  $(L.R)_{sus}=1.1\sim 1.5$  ; 그리고  $(L.R)_{con}=1.5\sim 2.5$ .

$$\text{if, } \delta_{lim} = (\sqrt{f_1^2 + f_2^2}) / 240, \quad h_{min} = 0.0037 \left[ \frac{\lambda(L.R)_{sus}(L.R)_{con}^3 \alpha f_n^3}{E_c(\sqrt{f_{ck}'(t)})^3} \right]^{1/5} + 2.1093 \quad (5)$$

$$\text{if, } \delta_{lim} = (\sqrt{f_1^2 + f_2^2}) / 480, \quad h_{min} = 0.0044 \left[ \frac{\lambda(L.R)_{sus}(L.R)_{con}^3 \alpha f_n^3}{E_c(\sqrt{f_{ck}'(t)})^3} \right]^{1/5} + 3.4349 \quad (6)$$

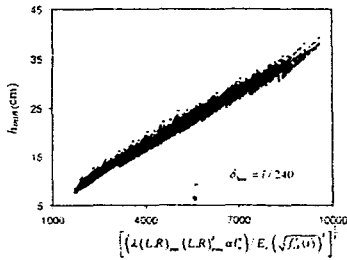


그림 3.(1) 허용 처짐이 l/240일 때 제안 최소 두께

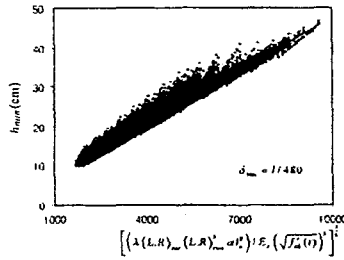


그림 3.(2) 허용 처짐이 l/480일 때 제안 최소 두께

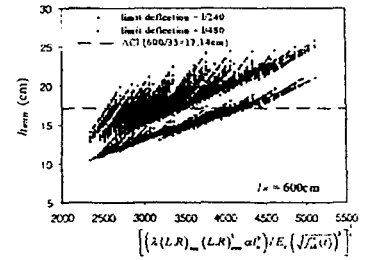


그림 4 순경간이 600cm일 때 제안 최소 두께와 ACI기준의 비교

#### 4. 현행 설계 기준과 비교

그림 4는 순경간이 600cm일 때, 제안 최소 두께 와 현행 설계 기준의 최소 두께를 비교한 것이다. 현행 설계 기준은 경간에 따라 일정한 최소 두께를 나타내는 반면, 제안 최소 두께는 경간외에 시공 하중의 크기, 하중 재하시의 재령, 콘크리트 강도, 허용 처짐의 크기등의 영향이 반영되어 있어 같은 경간에서도 여러 값을 나타내고 있다.

그림 5에서 7은 경간과 지주 지지 층수, 시공 속도가  $l_n/h$ 에 미치는 영향을 보여주고 있다. 경간이 길

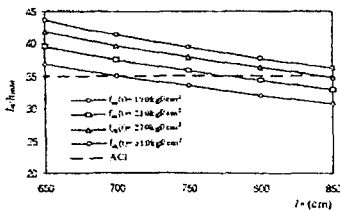


그림 5.(1) 경간이  $l_n/h$ 에 미치는 영향 ( $\delta_{lim} = l/240$ )

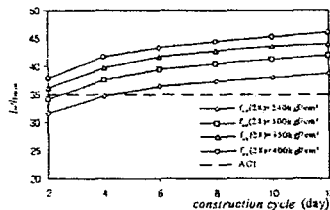


그림 6.(1) 지주지지 층수가  $l_n/h$ 에 미치는 영향 ( $\delta_{lim} = l/240$ )

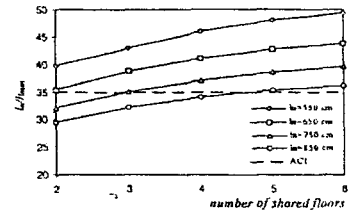


그림 7.(1) 시공 속도가  $l_n/h$ 에 미치는 영향 ( $\delta_{lim} = l/240$ )

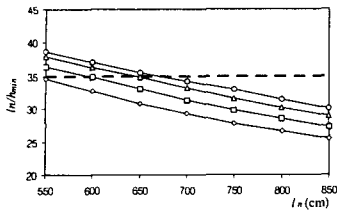


그림 5(2) 경간이  $l_n/h$ 에 미치는 영향 ( $\delta_{lim} = l/480$ )

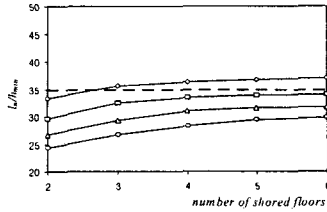


그림 6(2) 지주 지지 층수가  $l_n/h$ 에 미치는 영향 ( $\delta_{lim} = l/480$ )

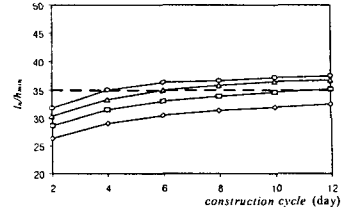


그림 7(2) 시공 속도가  $l_n/h$ 에 미치는 영향 ( $\delta_{lim} = l/480$ )

어질수록, 지주 지지 층수가 작아질수록, 시공 속도가 빨라질수록, 그리고 콘크리트 강도가 작아질수록 사용성을 만족시키기 위한 최소두께의 크기는 커지는 것을 알 수 있다. 또한 허용 처짐이  $l/240$ 일 때는 현행 설계 기준의 최소 두께로도 대부분의 경우 사용성을 만족시킬 수 있으나 허용 처짐이  $l/480$ 일 때는 현행 설계 기준의 최소 두께로는 대부분의 경우 사용성을 만족시킬 수 없다. 그러나 허용 처짐을  $l/240$ 으로 할지라도 순경간 700cm 이상의 슬래브를  $240 \text{ kgf/cm}^2$ 이하의 콘크리트 강도를 사용하여 3개 층 이하를 지주로 지지하여, 4일 이하의 속도로 한층씩 타설할 때는 사용성에 대한 검토가 필요하다.

## 5. 결론

현행 설계기준은 경험에 바탕을 둔 것으로 시공 하중의 크기, 시공 속도(construction cycle)등의 시공 계획 및 콘크리트 강도등을 반영할 수 없다.

본 연구에서는 규준의 슬래브 처짐 계산 방법을 토대로 반복 계산을 통해 콘크리트 강도와 시공 계획을 반영할 수 있는 최소 두께 근사식을 제안하였다.

허용 처짐을  $l/240$ 으로 할 경우, 비교적 간단한 현행 설계 기준의 최소 두께로도 대부분의 조건에서 사용성을 만족하였다. 그러나 허용 처짐을  $l/480$ 으로 할 경우 현행 설계 기준의 최소 두께로는 대부분의 경우 사용성을 만족시킬 수 없었다. 따라서 처짐에 의해 손상되기 쉬운 비구조 요소를 지지 또는 부착한 지붕이나 바닥에 대해서는 슬래브의 기하학적 형상 및 시공 계획, 사용 콘크리트의 강도에 대한 충분한 검토가 필요하다.

## 참고 문헌

1. 한국콘크리트학회, 대한건축학회, 콘크리트구조 설계기준, 1999.
2. Grundy, Paul, and Kabaila, A., "Constructon Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings", ACI Journal, Proceedings V. 60, No. 12, Dec 1963, pp. 1729-1738.
3. Rangan B.Vijaya, "Estimation of Slab Deflections in Flat Plate Buildings", ACI Journal, Proceedings V. 83, No. 2, March 1986, pp. 269-273.
4. Thompson, David P., and Scanlon Andrew, "Minimum Thickness Requirements for Control of Two-Way Slab Deflections", ACI Structural Journal, V. 85, No. 1, January 1988, pp. 12-22.
5. Mosallam, Khalid H., and Chen, W.F., "Determining Shoring Loads for Reinforced Concrete Construction", ACI Structural Journal, V. 88, No. 3, March 1991, pp. 340-350.
6. ACI Committee 435, "State-of-the Art Report on Control of Two-Way Slab Deflections", ACI Structural Journal, V. 88, No. 4, July 1991, pp. 501-514.