

시공 하중의 영향을 받는 플랫 플레이트의 최소 두께

강성훈¹⁾ · 최경규¹⁾ · 박홍근^{1)*}

¹⁾ 서울대학교 건축학과

(2003년 1월 20일 원고접수, 2003년 5월 31일 심사완료)

Minimum Thickness Requirements of Flat Plate Affected by Construction Load

Sung-Hoon Kang¹⁾, Kyoung-Kyu Choi¹⁾, and Hong-Gun Park^{1)*}

¹⁾ Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received January 20, 2003, Accepted May 31, 2003)

ABSTRACT

During construction of reinforced concrete building, construction load two times as much as the self weight of a slab, is imposed on the slab, and strength and stiffness of the early-age concrete are not fully developed. As the result, the construction load frequently causes excessive deflection and cracking in the flat plate. The minimum thickness of flat plate specified by the current design codes does not properly address such effect of the construction load. In the present study, a simplified method was developed to calculate the deflection of flat plate affected by the construction load. The proposed method can consider the effects of a variety of design parameters such as the aspect ratio of plate, boundary condition, concrete strength, and construction load. A design equation for the minimum thickness was developed based on the proposed method.

Keywords : flat plate, deflection, minimum thickness, construction load

1. 서 론

철근콘크리트 골조의 공사중에 새로 타설되는 슬래브는 지주를 통하여 이전에 타설된 몇 개층의 슬래브에 의해 지지된다. 이 때 새로 타설되는 슬래브의 자중 및 시공 하중으로 인해 초기 재령의 슬래브에 과도한 하중이 작용할 수 있으며, 이러한 과도한 시공 하중은 시공 중 슬래브의 구조 안전성뿐만 아니라 사용성에도 영향을 미칠 수 있다. 과도한 시공 하중은 아직 완전히 경화되지 않은 슬래브에 휨 균열과 크리프 처짐을 유발시키고, 이러한 초기 휨 손상은 장기 거동에 큰 영향을 미치게 된다.

특히 보가 없는 플랫 플레이트 구조는 시공 하중에 의해 큰 영향을 받을 수 있으며, 시공 속도 증진을 위해 한 개 층 당 2일, 3일 공정이 흔히 사용되는 추세이므로 시공 시 안전성 및 사용성을 반영할 수 있는 설계 방법의 개발이 필요하다.

슬래브의 장기 처짐은 슬래브의 두께, 경계 조건, 철근

량, 슬래브의 기하학적 형상, 콘크리트 타설 후 경과 시간 등과 같은 여러 변수들에 의하여 영향을 받는다. 따라서 정확한 처짐을 계산하기는 쉽지 않으므로 콘크리트구조설계기준¹⁾ (KCI 기준) 및 ACI 318기준²⁾에서는 플랫 플레이트의 최소 두께를 규정하고 있다. 이 기준에 따르면 지판이 없는 내부 슬래브의 경우 최소 두께를 순경간 l_n 에 대해 $l_n/35 \sim l_n/33$ 으로 규정하고 있다.

그러나 슬래브의 안전성 및 사용성은 위에서 언급한 여러 변수들의 영향뿐만 아니라 시공 중 조건인 시공 하중, 층 공사 주기(floor construction cycle), 초기 재령 콘크리트의 강도 등의 영향을 받으므로 이를 고려할 수 있는 최소 두께에 대한 설계식이 필요하다. 이러한 목적을 위하여 몇몇 연구자들이 플랫 플레이트 최소 두께와 장기 처짐 계산 방법에 대해 연구하였다. Table 1은 장기 처짐 계산 방법에 대한, Table 2는 플랫 플레이트 최소 두께에 대한 기존 연구 결과를 개략적으로 정리한 것이다.

Asamoah³⁾의 연구 결과에 의하면 사용성을 만족하기 위한 슬래브의 최소 두께는 지주 지지 층수 및 층 공사 주기에 영향을 많이 받으며, Thompson⁶⁾은 보가 없는 슬래브의 경우 현행 설계 기준 보다 10% 증가시키는 것을

* Corresponding author
Tel : 02-880-7055
E-mail : hgpark@gong.snu.ac.kr

Table 1 Existing methods for calculating deflection

ACI ⁽⁴⁾		Gardner ⁽⁵⁾	Asamoah ⁽³⁾
Multiplier method	Calculation		
$\delta_t = \lambda_i \delta_{sus}$ $\lambda_i = 1 + \lambda_{sh} + \lambda_{cp}$ δ_t =total deflection δ_{sus} =immediate deflection due to sustained load λ_{sh} =multiplier for shrinkage λ_{cp} =multiplier for creep	$\delta_t = \delta_{sus} + \delta_{sh} + \delta_{cp}$ δ_{sh} =additional deflection due to shrinkage δ_{cp} =additional deflection due to creep	$\delta_t = \delta_{sh} + \delta_{sus} \left[1 + C_i \left(1 + \frac{CL}{UL} \right) \right]$ C_i = creep coefficient CL =maximum construction load UL =design capacity	$\delta_t = \frac{0.000425x}{h^2} \left[\frac{l_n^4}{t_0^{0.2}} \right] \left[\frac{27.1}{E_{cm28}} \right] \left[\frac{1}{\beta} \right]$ h =slab thickness (m) l_n =longer clear span (m) $x=1.0$ for corner panel and 0.4 for an interior panel t_0 =construction cycle E_{cm28} =mean modulus of elasticity at 28 days (GPa) β =aspect ratio

Table 2 Recommendations for minimum thickness of slab

ACI ⁽²⁾	Thompson ⁽⁶⁾	Rangan ⁽⁷⁾	Asamoah ⁽³⁾
$h_{min} = \frac{l_n(800 + 0.005f_y)}{36000}$ l_n =clear span f_y =yield strength of tensile flexural reinforcement,(psi)	$h_{min} = \frac{l_n}{30} k(\beta)$ $k(\beta) = 1.20 - 0.2\beta \geq 0.9$ l_n =clear span β =aspect ratio	$\frac{l}{h} < k_1 k_2 \frac{\delta_{lim}}{l_n} \left[\frac{\gamma b E_c}{w_i + \lambda w_s} \right]^{1/3}$ k_1 =a factor to account for support conditions k_2 =a slab-system factor to account for two-way action δ_{lim} =limit deflection $\gamma = I_e / I_g$ b =width of slab w_i = distributed live load w_{sus} =distributed sustained load λ = long-term multiplier	$h_{min} = \frac{1}{x} \frac{l_n^{1.5}}{t_0^{0.2}} \left[\frac{38}{f_{cm28}} \right]^{0.25} (1.15 - 0.15\beta)$ h_{min} =minimum slab thickness (m) x =span/thickness $f_{cm28} = f_{c28} + 8 = 28$ day mean concrete strength,(MPa) f_{c28} =28 day characteristic of specified, Concrete strength,(MPa)

권장하고 있다. 그러나 대부분 기존 연구의 제안식이 비선형 유한 요소 해석이나 실험을 통해 각 변수들의 영향을 추정하여 제안한 경험식이므로 모든 변수들의 영향을 반영하지 못하고 있으며, 제안식에 대한 이론적 근거가 충분치 못한 한계점을 가지고 있다.

본 연구에서는 시공 하중, 층 공사 주기 등의 영향을 반영할 수 있는 보다 합리적인 플랫 플레이트의 최소 두께 산정식을 제안하여 설계 단계에서 시공 계획을 반영할 수 있는 설계 방법을 제안하고자 한다.

2. 시공 하중

시공 중 슬래브에 작용하는 시공 하중은 Grundy⁽⁸⁾의 방법이나 이를 바탕으로 수정한 Mosallam⁽⁹⁾의 방법을 이용하여 슬래브 자중의 크기에 대한 비로 나타낼 수 있다. Grundy는 슬래브 타설과 지주 제거 등 시공 과정에서 추가되는 하중을 지주로 연결된 각 층의 강성에 비례하여 분배시킴으로써 시공 중 슬래브에 작용하는 시공 하중을 산정하였다. Grundy는 시공 하중 산정에서 다음 층 슬래

브가 타설되는 동안 시공 하중이 일정하다는 가정을 사용하였으나, 실제로는 시간이 경과함에 따라 새로 타설된 슬래브의 콘크리트가 경화되므로 최상층의 슬래브도 강성에 비례하여 하중을 분담한다. Mosallam은 이를 고려하여 수정된 방법을 제시하였으며, Fig. 1은 Mosallam의 시공 하중 산정 과정을 나타내고 있다. Fig. 1에 제시된 숫자는 슬래브와 지주가 부담하는 시공 하중의 크기로서 슬래브 자중에 대한 시공 하중의 비율을 나타내는데, 왼쪽의 숫자는 각 층의 강성을 동일하다고 가정했을 때, 오른쪽의 숫자는 콘크리트 재령에 따라 각 층의 강성 차이를 고려하였을 때의 시공 하중의 크기이다. 철근콘크리트 슬래브는 즉시 처짐 외에 시간의 경과에 의하여 장기 추가 처짐이 발생한다. 장기 처짐은 온도와 습도, 양생 조건, 재하 시의 재령과 함수량, 압축 철근의 철근비, 지속 하중의 크기 및 기타 요인들에 의해 영향을 받는다. 콘크리트구조설계기준에서는 지속 하중에 의한 즉시 처짐에 장기처짐계수 λ 를 곱하여 장기 추가 처짐을 구하도록 규정하고 있다.

$$\delta_{inc} = \lambda \delta_{sus} \quad (1)$$

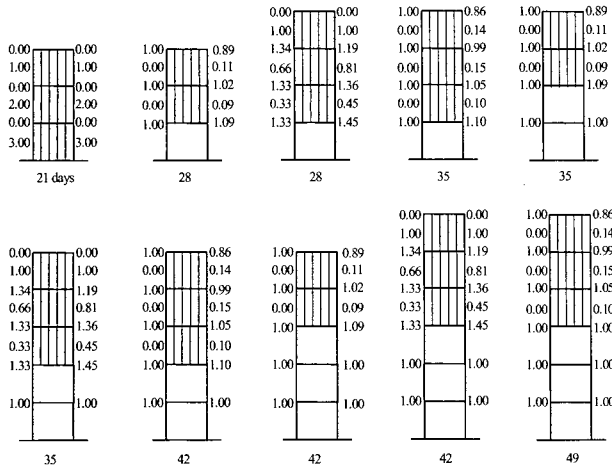


Fig. 1 Construction loads for shored construction with 7 day-construction cycle (Mosallam⁹⁾)

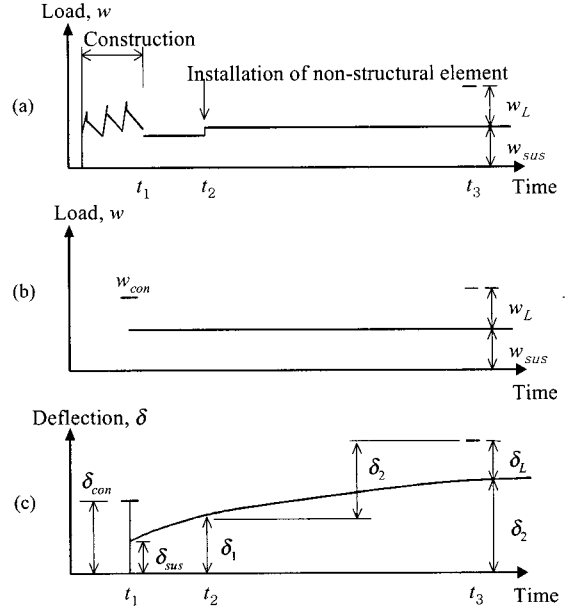
시공 하중은 사용 하중보다 클 수 있으며 재령이 작은 슬래브에 재하되므로, 시공 하중은 슬래브에 휨균열을 발생시켜 휨강성을 저하시킬 수 있다. 슬래브의 휨균열은 회복이 되지 않으므로 시공 하중보다 작은 지속 하중이 재하된다 하더라도 장기 처짐은 시공 하중에 의하여 저하된 휨강성에 의하여 더욱 증가될 수 있다.

시공 하중에 의하여 발생하는 휨균열에 의한 강성저하를 고려하기 위하여 참고문헌 4에 나타난 바와 같이 식(1)의 장기 추가 처짐은 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{inc} = \lambda \delta_{sus} = \lambda \frac{w_{sus}}{w_{con}} \delta_{con} \quad (2)$$

여기서, δ_{con} =시공 하중에 의한 즉시 처짐, w_{sus} =지속 하중, w_{con} =시공 하중으로 Grundy 또는 Mossalam의 방법에 의하여 구할 수 있다(Table 3). 식(2)에서 지속하중에 의한 처짐은 시공하중에 의하여 저하된 강성에 의하여 결정되므로 시공하중에 의한 처짐에 비례적으로 나타낼 수 있다. 식(2)를 적용하기 위해서는 시공 기간 중 최대 휨균열을 발생시키는 하중조건을 구하여야 한다.

Fig. 2(a)는 실제 시공 중 하중 이력을 나타내고 있는데, 대단히 복잡하므로 실제 하중 이력을 수계산에 반영하기는 어렵다. 따라서 ACI⁴⁾에서는 최대 시공 하중에 의해 휨강성이 가장 크게 감소한다는 가정하에, Fig. 2(b)와 같이 최대 시공 하중을 나타내는 단순화된 이력을 제안하고 있다. 그러나 Fig. 3에 나타난 바와 같이 시공 중의 슬래브는 콘크리트의 재령에 따라 점점 그 강도를 발현하게 된다. 따라서 최대 시공 하중보다 작은 시공 하중이라도 초기 재령의 슬래브에 재하된다면 구조 안전성 뿐만 아니라 휨균열에 더욱 치명적일 수 있다. 즉, Fig. 3에서 w_{con}/R_m



(a) Actual load history; (b) Simplified load history; and (c) Deflection history

Fig. 2 Simplified load history and corresponding deflection history ;

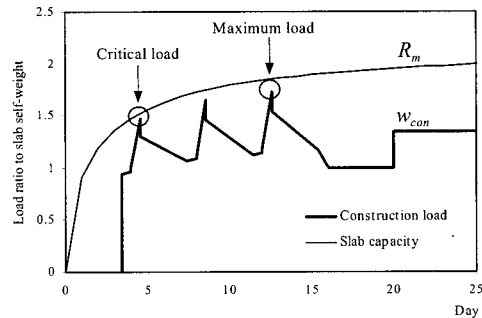


Fig. 3 Maximum and critical construction loads

이 최대가 되는 지점에서 슬래브에 가장 큰 휨균열이 발생할 것으로 예상되며, 따라서 이 때의 시공 하중을 기준으로 식(2)에 따라 슬래브 처짐을 산정해야 한다. 여기서, R_m 은 재령 t 의 슬래브 강도가 지지할 수 있는 등분포하중을 슬래브의 자중으로 나눈 값으로서 슬래브의 재하능력을 나타낸다.

또한 슬래브 타설 시에는 슬래브 자중에 의한 시공 하중 외에, 타설에 필요한 장비와 인원으로 인해 작업 하중이 추가된다. 이 작업 하중은 슬래브가 타설된 후 없어지는, 짧은 기간 재하되는 하중이지만 슬래브의 균열에 큰 영향을 미칠 수 있다. 작업 하중에 대해 콘크리트 표준시방서¹⁰⁾에서는 1,500Pa을, Mosallam⁹⁾은 0.5D를 제안하고 있다. 여기서, D는 슬래브 자중의 크기를 의미한다.

앞서 기술한 시공 하중 산정 방법(Fig. 1)에서, 시공 하중은 슬래브 자중의 비로 정의되는데, 콘크리트 표준시방

Table 3 Critical construction load

Number of shored floors	Construction cycle (day)					
	2	3	4	5	6	7
3	1.809D	1.748D	1.721D	1.703D	1.693D	1.69D
4	1.672D	1.618D	1.591D	1.577D	1.569D	1.564D
5	1.585D	1.536D	1.513D	1.5D	1.49D	1.483D
6	1.524D	1.48D	1.459D	1.446D	1.437D	1.429D
7	1.478D	1.438D	1.419D	1.406D	1.397D	1.39D
10	1.393D	1.36D	1.343D	1.331D	1.311D	1.314D
12	1.358D	1.328D	1.311D	1.299D	1.29D	1.283D

D = self weight of slab
 form+shore = 0.1D
 construction live load = 0.5D

서에서 제시하는 작업하중의 크기 1,500 Pa은 슬래브 두께가 결정되지 않은 상태에서는 슬래브 자중의 비로 나타낼 수 없다. 따라서 작업 하중에 대해 본 연구에서는 Mosallam의 제안에 따라서 작업 하중의 크기를 0.5D로 가정하였다.

Mosallam의 방법에 따라 다양한 지주 층수와 공사 주기에 대하여 슬래브에 재하되는 시공 각 단계의 시공 하중과 재령에 따른 슬래브 강도를 비교하였다. 비교 결과에 따라 가장 큰 강성저하를 일으키는 w_{con}/R_m 가 최대가 되는 시점에서의 시공 하중의 크기를 Table 3에 나타내었다. Table 3의 모든 경우에서 첫 시공 하중이 재하될 때 w_{con}/R_m 가 최대값을 나타냈다. 즉, Table 3에 나타난 시공 하중은 층 당 공기가 3일이면 재령 3일에 재하되는 시공 하중을 의미한다. 시공 중 슬래브 강도에 영향을 주는 재령에 따른 콘크리트의 재료 역학적 성질의 변화는 한상훈¹¹⁾에 의해 제시된 예측 모델식을 사용하였다.

3. 최소두께의 계산

3.1 해석 모델

슬래브는 네 귀퉁이가 기둥에 의해서 지지되는 면 부재이므로 정확한 처짐을 구하기 위해서는 유한 요소법 등 정밀한 구조 해석을 이용하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 최소 슬래브 두께에 관한 설계식을 유도하기 위하여 보다 단순한 해석 방법을 사용하였다. 2 방향 슬래브의 처짐을 쉽게 구하기 위하여 2 방향 슬래브를 보로 치환하는 몇 가지 근사적 방법이 제안되었는데, 본 연구에서는 슬래브 즉시 처짐의 산정을 위해 Rangan⁷⁾이 제안한 방법을 사용하였다. Rangan은 각 방향의 주열대와 중간대를 연속보로 간주하고 처짐을 계산하였다(Fig. 4).

슬래브의 총 모멘트는 직접 설계법이나 등가 골조법 등의 설계방법에 따라 주열대와 중간대로 분배할 수 있다.

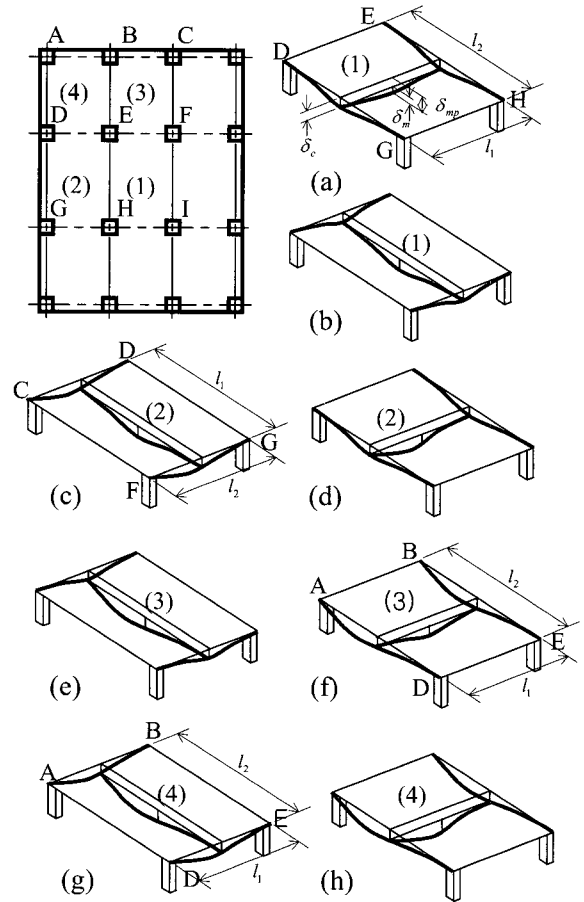


Fig. 4 Equivalent beam models for calculating deflection of two-way slab

주열대와 중간대의 모멘트가 결정되면 이 모멘트를 받는 각 등가보의 처짐을 계산하고 주열대와 중간대의 처짐을 중첩시켜서 슬래브의 처짐을 구할 수 있다.

각 등가보의 처짐은 콘크리트구조설계기준에 따라 식(3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{5}{48} \frac{l_n^2}{EI} [M_m - 0.1(M_L + M_R)] \quad (3)$$

여기서, M_L, M_R = 단부 모멘트, M_m = 중앙부 모멘트.

슬래브의 처짐 δ_{mp} 는 주열대 등가보의 처짐 δ_c 와 중간대 등가보의 처짐 δ_m 을 중첩시켜 구할 수 있다.

$$\delta_{mp} = \delta_c + \delta_m \quad (4)$$

Fig. 4에서 (a), (b)는 내부 슬래브, (c)~(f)는 외부 슬래브, (g), (h)는 코너 슬래브의 처짐이다. 여기서 l_1 = 중간대의 경간, l_2 = 주열대의 경간이다. 이론적으로 (a)와 (b)의 처짐, (c)와 (d)의 처짐, (e)와 (f)의 처짐, (g)와 (h)의 처짐은 각각 같아야 하지만, 처짐 계산 방법이 근사적

방법이므로 실제로는 동일한 값을 갖지 않는다. 따라서 본 연구에서는 각 경우에 대한 계산결과를 비교하였고, 그 결과 대체로 가장 큰 처짐이 나타나는, 내부 슬래브에 대해서는 (a)의 경우를, 외부 슬래브에 대해서는 (f)의 경우를, 코너 슬래브에 대해서는 (g)의 경우를 설계식 유도에 사용하였다.

3.2 최소 두께의 산정 방법

등가보의 처짐 식(3)과 슬래브의 처짐 식(4)를 식(2)에 대입하여 장기 추가 처짐을 나타낼 수 있다.

$$\delta_{inc} = \lambda \frac{5w_{sus}}{48w_{con}} \left[\frac{l_{n2}^2}{E_c I_{e2}} \{M_{m2} - 0.1(M_{L2} + M_{R2})\} + \frac{l_{n1}^2}{E_c I_{e1}} \{M_{m1} - 0.1(M_{L1} + M_{R1})\} \right] \quad (5)$$

여기서, l_{n2} = 주열대 방향의 순경간, l_{n1} = 중간대 방향의 순경간, E_c = 콘크리트 탄성 계수, I_{e2} = 주열대 유효 단면 2차 모멘트, I_{e1} = 중간대 유효 단면 2차 모멘트, M_{m2} = 시공 하중에 의한 주열대 정모멘트, M_{m1} = 중간대 정모멘트, M_{L2}, M_{R2} = 주열대 부모멘트, M_{L1}, M_{R1} = 중간대 부모멘트.

시공 하중의 크기는 슬래브 자중에 대한 비 $(LR)_{con}$ 로 나타낼 수 있고, 슬래브 자중은 슬래브 두께에 비례한다. 따라서 시공 하중에 의해 슬래브에 작용하는 모멘트 중 주열대 방향의 총 정적 모멘트 M_{o2} (KN·m)와 직접 설계법의 모멘트 분배 계수를 사용하여 내부 슬래브의 주열대 정모멘트 $(M_{m2})_{int}$ (KN·m), 외부 슬래브의 주열대 정모멘트 $(M_{m2})_{ext}$ (KN·m), 그리고 코너 슬래브의 주열대 정모멘트 $(M_{m2})_{cor}$ (KN·m)를 산정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{o2} &= \frac{w_{con} \cdot l_1 \cdot l_{n2}^2}{8} \\ &= w_c \cdot h \cdot (LR)_{con} \frac{l_1 \cdot l_{n2}^2}{8} \\ &= [3 \cdot (LR)_{con} \alpha_2^2 l_1 l_2^2] h \end{aligned} \quad (6a)$$

$$(M_{m2})_{int} = (0.35) (0.6) M_{o2} \quad (6b)$$

$$(M_{m2})_{ext} = (0.52) (0.6) M_{o2} \quad (6c)$$

$$(M_{m2})_{cor} = (0.52) (0.6) M_{o2} \quad (6d)$$

여기서, $\alpha_2 = l_{n2}/l_2$, h =슬래브 두께(m), w_c =철근 콘크리트 단위 체적 중량으로서 보통 중량 콘크리트의 경우 24 KN/m^3 .

Fig. 4(a), (f)의 경우에서 중형비 $\beta = l_2/l_1$ 이고, (g)의 경우에서 중형비 $\beta = l_1/l_2$ 이다. 그리고 유효 단면 2차 모멘트는 전단면에 대한 단면2차 모멘트의 비 γ 로 나타내면 다음과 같다.

Fig. 4(a), (f)의 경우,

$$I_{e1} = \gamma_1 I_{g1} = \gamma_1 \frac{b_2 h^3}{12} = (2\beta - 1) \gamma_1 \frac{l_1 h^3}{24} \quad (7a)$$

$$I_{e2} = \gamma_2 I_{g2} = \gamma_2 \frac{b_1 h^3}{12} = \gamma_2 \frac{l_1 h^3}{24} \quad (7b)$$

Fig. 4(g)의 경우,

$$I_{e1} = \gamma_1 I_{g1} = \gamma_1 \frac{b_2 h^3}{12} = \gamma_1 \frac{l_2 h^3}{24} \quad (7c)$$

$$I_{e2} = \gamma_2 I_{g2} = \gamma_2 \frac{b_1 h^3}{12} = \gamma_2 \frac{l_2 h^3}{24} \quad (7d)$$

여기서, b_2 = 주열대 등가보의 폭, b_1 = 중간대 등가보의 폭이며, Fig. 4(a),(f)의 경우에서 $b_1 = (2\beta - 1)l_1/2$, $b_2 = l_1/2$ 이다.

식(6), (7)을 식(5)에 대입하면, 내부, 외부, 코너 슬래브의 장기 추가 처짐 $(\delta_{inc})_{int}$, $(\delta_{inc})_{ext}$, $(\delta_{inc})_{cor}$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\delta_{inc})_{int} &= \left[\frac{5 \lambda (LR)_{sus}}{2E_c} \right] \\ &\times \left[0.32 \frac{\alpha_1^4}{(2\beta - 1)\gamma_1} l_1^3 + 0.34 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} l_2^3 \right] \frac{l_2}{h^2} \text{ (m)} \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} (\delta_{inc})_{ext} &= \left[\frac{5 \lambda (LR)_{sus}}{2E_c} \right] \\ &\times \left[0.32 \frac{\alpha_1^4}{(2\beta - 1)\gamma_1} l_1^3 + 0.7 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} l_2^3 \right] \frac{l_1}{h^2} \text{ (m)} \end{aligned} \quad (8b)$$

$$\begin{aligned} (\delta_{inc})_{cor} &= \left[\frac{5 \lambda (LR)_{sus}}{2E_c} \right] \\ &\times \left[0.7 \frac{\alpha_1^4}{\gamma_1} l_1^3 + 0.7 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} l_2^3 \right] \frac{l_2}{h^2} \text{ (m)} \end{aligned} \quad (8c)$$

여기서, $\alpha_1 = l_{n1}/l_1$.

콘크리트구조설계기준¹⁾에서는 사용성을 확보하기 위해 허용 처짐에 제한을 두고 있는데, 장기 추가 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. 콘크리트구조설계 기준에는 플랫 플레이트의 경간 l 에 대한 명확한 규정이 없으나 Thompson⁶⁾은 대각 기둥 사이의 중심 간 거리를, Asamoah³⁾는 주열대의 기둥 사이의 거리를 경간 l 로 정의한 바 있다. 본 연구에서는 슬래브 중앙부의 처짐으로서 사용성을 검토하기 위해 Thompson의 제안에 따라서 대각 기둥 사이의 중심간 거리를 경간 l 로 정의하였다. 장기 추가 처짐은 허용 처짐보다 작아야 하므로 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{inc} \leq \delta_{lim} = l/240 \text{ or } l/480 \quad (9)$$

여기서, $l = \sqrt{l_1^2 + l_2^2}$. 식(8)을 식(9)에 대입하여 정리하면 식(10)과 같이 플랫 플레이트에 대한 최소 두께 식을 구할 수 있다.

$$(h_{min})_{int} = A \left[\frac{0.32 \frac{\alpha_1^4}{\gamma_1} + 0.34 \beta^3 (2\beta - 1) \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2}}{\beta^2 (2\beta - 1) \sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{1/2} \times \left[\frac{\lambda (LR)_{sus} l_2^3}{E_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (m) \quad (10a)$$

$$(h_{min})_{ext} = A \left[\frac{0.32 \frac{\alpha_1^4}{\gamma_1} + 0.7 \beta^3 (2\beta - 1) \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2}}{\beta^2 (2\beta - 1) \sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{1/2} \times \left[\frac{\lambda (LR)_{sus} l_2^3}{E_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (m) \quad (10b)$$

$$(h_{min})_{cor} = A \left[\frac{0.7 \beta^3 \frac{\alpha_1^4}{\gamma_1} + 0.7 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2}}{\beta^2 \sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{1/2} \times \left[\frac{\lambda (LR)_{sus} l_2^3}{E_c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (m) \quad (10c)$$

여기서, $\delta_{lim} = l/240$ 일 때 $A=24.49$, $\delta_{lim} = l/480$ 일 때 $A=34.64$.

식(10)에서 유효 단면 2차 모멘트 비 γ 는 작용 하중의 크기, 콘크리트의 강도, 슬래브 두께 등의 영향을 받으므로 이 값을 구하기 위해서는 다음의 과정이 필요하다.

콘크리트구조설계기준에서는 한 단면에서 휨 균열 이후 저하된 단면성능을 반영하는 유효 단면 2차 모멘트를 다음과 같이 정의한다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (11)$$

균열 모멘트 $M_{cr} = f_r I_g / y_t$, $f_r = 0.6 \sqrt{f_{ck}}$ (MPa), y_t = 중립축으로부터 인장연단까지의 거리, M_a = 작용 모멘트, I_g = 전단면 2차 모멘트, I_{cr} = 균열 단면 2차 모멘트.

연속보에서는 정·부 모멘트 영역에서 유효 단면 2차 모멘트는 차이를 보이는데, 콘크리트구조설계 기준에서는 식(12)와 같이 평균값을 사용한다.

양단 연속일 경우,

$$(I_e)_{avg} = 0.7 I_m + 0.15 (I_{eL} + I_{eR}) = \gamma \cdot I_g \quad (12a)$$

1단 연속일 경우

$$(I_e)_{avg} = 0.85 I_m + 0.15 (I_{e,con}) = \gamma \cdot I_g \quad (12b)$$

여기서, $(I_e)_{avg}$ = 평균 유효 단면 2차 모멘트, I_m = 정 모멘트 영역의 유효 단면 2차 모멘트, I_{eL}, I_{eR} = 부모멘트 영역의 유효 단면 2차 모멘트, $I_{e,con}$ = 1단 연속일 때 연속되는 단부의 유효 단면 2차 모멘트.

콘크리트의 인장강도를 무시할 때, 균열 단면 2차 모멘트는 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + n A_s (d - kd)^2 = B I_g \quad (13)$$

여기서, $k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n$, A_s = 철근 단면적, $n = E_s / E_c$, B = 전단면 2차 모멘트에 대한 비율.

균열 단면 2차 모멘트는 식(13)과 같이 철근비, 인장 외단으로부터 인장 철근까지의 거리, 탄성계수 비의 영향을 받는다. 그러나 슬래브 두께가 아직 결정되지 않은 설계 단계에서는 철근비뿐만 아니라 강성비, 인장 철근의 위치를 알지 못하므로, 이 값들에 대한 가정이 필요하다. 일반적으로 시공되는 플랫 플레이트 구조에 대한 사례 조사 결과 일반적으로 주열대의 단부에서는 0.005~0.007의 철근비가 이외의 부분에서는 0.002~0.004의 철근비가 주로 사용되었다.

본 연구에서는 안전측으로서 주열대 단부는 0.005, 주열대 단부를 제외한 구간에서는 0.002의 철근비를 가정하였고, 또한 인장 외단에서 인장 철근의 거리를 0.0375m, $n = 8$ 로 가정하면 식(13)의 B 를 구할 수 있다.

$\rho = 0.002$ 인 경우

$$B_1 = 0.15183 \times (1 - 0.0375/h)^3 \quad (14)$$

$\rho = 0.005$ 인 경우

$$B_2 = 0.33244 \times (1 - 0.0375/h)^3 \quad (15)$$

식(11)에서 유효 단면 2차 모멘트를 구하기 위해서는 $M_{cr}/M_a (\leq 1)$ 의 값이 필요하다. 식(6)의 작용 모멘트 M_a 를 대입하여 M_{cr}/M_a 을 슬래브 두께에 대하여 정리하면 식(16)과 같다.

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = C \times \frac{\sqrt{f_{cu}(t)}}{(LR)_{con} \cdot l_n^2} h \leq 1 \quad (16)$$

여기서, 식 (11)의 콘크리트 설계 강도 f_{ck} 대신에 시공 하중 재하 시의 콘크리트 강도 (MPa) $f_{cu}(t)$ 를 사용하였다.

각 영역의 철근비 및 등가보의 폭, 작용 모멘트의 크기 등이 다르므로 식(16)의 상수 C 도 다른 값들을 갖는다. 내부 슬래브, 외부 슬래브, 코너 슬래브에 대한 각 지점에서의 C 의 값은 Table 4에 나타나 있다.

식(16)에 나타나 있듯이 M_a/M_{cr} 의 크기는 모두 $[\sqrt{f_{cu}(t)}/\{(LR)_{con} \cdot l_n^2\}]h$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 이 값의 크기에 따라 유효 단면 2차 모멘트가 결정된다.

식 (11)~(16)을 이용하여 평균 유효단면 2차 모멘트비 γ 를 정의하고 있으나, 여전히 γ 는 슬래브 두께의 함수이므로 식(10)을 이용하여 플랫 플레이트의 최소 두께를 직접 구할 수는 없다. 따라서 반복 계산 과정이 필요하며, 그 과정은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트구조설계기준을 이용하여 슬래브두께를 가정한다.
- 2) 식(14)와 식(15)를 이용 각 구간에서의 균열 단면 2차 모멘트의 비 B 를 산정한다.
- 3) 식(16)을 이용하여 $[\sqrt{f_{cu}(t)}/\{(LR)_{con} \cdot l_n^2\}]h$ 에 따라 각 영역에서의 M_{cr}/M_a 를 구한다.
- 4) 2)와 3)에서 구한 B , M_{cr}/M_a 를 식(11), (12)에 대입하여 유효 단면 2차 모멘트의 비 γ 를 구한다.
- 5) 4)에서 구한 γ 를 식(10)에 대입하여 최소 두께를 구한다.
- 6) 5)에서 구한 최소 두께를 이용하여 최소 두께가 수렴할 때까지 2)에서부터 5)의 계산과정을 반복 수행한다.

4. 최소 두께를 위한 설계식

슬래브의 최소두께에 대한 시공하중의 영향을 설계기준에 반영하기 위해서는 앞서 소개된 반복계산방법 보다 간단한 설계식의 유도가 필요하다. 슬래브에 작용하는 하중

Table 4 Coefficient C in Eq. (16)

Locations		Interior panel Fig. 4(a)	Exterior panel Fig. 4(f)	Corner panel Fig. 4(g)
Middle strip	Positive moment	$119.05\beta \times (2\beta - 1)$	$119.05\beta \times (2\beta - 1)$	53.42
	Negative moment	$102.56\beta \times (2\beta - 1)$	$102.56\beta \times (2\beta - 1)$	31.75
Column strip	Positive moment	79.37	53.42	53.42β
	Negative moment	34.19	31.75	31.75β

이 과도하여 슬래브의 모든 단면에서 균열이 발생한 경우, 식(11)~(16)을 이용하여 γ_1, γ_2 를 정리하면 근사적으로 $[h\sqrt{f_{cu}(t)}/\{(LR)_{con} \cdot l_n^2\}]^3$ 의 식으로 나타낼 수 있다. 이를 식(10)에 대입하면 슬래브의 모든 단면에서 균열이 발생했을 때의 최소 두께식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(h_{min})_{int} = 0.0398 A^{2/5} \left[\frac{2.32 + 10.16\beta^6(2\beta - 1)^4}{\beta^5(2\beta - 1)^4\sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{1/5} \times \left[\frac{\lambda(LR)_{sus}(LR)_{con}^3 \alpha l_n^2}{E_c(\sqrt{f_{cu}(t)})^3} \right]^{1/5} \quad (m) \quad (17a)$$

$$(h_{min})_{ext} = 0.0398 A^{2/5} \left[\frac{2.32 + 56.86\beta^6(2\beta - 1)^4}{\beta^5(2\beta - 1)^4\sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{1/5} \times \left[\frac{\lambda(LR)_{sus}(LR)_{con}^3 \alpha l_n^2}{E_c(\sqrt{f_{cu}(t)})^3} \right]^{1/5} \quad (m) \quad (17b)$$

$$(h_{min})_{cor} = 0.0398 A^{2/5} \left[\frac{63.31\beta^6 + 56.86}{\beta^5\sqrt{1 + \beta^2}} \right]^{1/5} \times \left[\frac{\lambda(LR)_{sus}(LR)_{con}^3 \alpha l_n^2}{E_c(\sqrt{f_{cu}(t)})^3} \right]^{1/5} \quad (m) \quad (17c)$$

여기서, l_n =장변 방향 순경간, $\alpha = l_n/l$, l =장변 방향 경간.

식(17)을 이용하여, Fig. 4의 모든 경우에 대하여 최소 두께식을 구할 수 있으며, 일반적인 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$h_{min} = 0.0398 A^{2/5} k(\beta) Q \quad (m) \quad (18)$$

여기서,

$$Q = \left[\frac{\lambda(LR)_{sus}(LR)_{con}^3 \alpha l_n^2}{E_c(\sqrt{f_{cu}(t)})^3} \right]^{1/5}$$

$k(\beta)$ 는 종횡비의 영향을 나타내는 계수로서 Fig. 4의 각 경우마다 다르다. Fig. 5는 Fig. 4의 처짐 계산 방법에 따른 $k(\beta)$ 를 나타낸 것으로 내부 슬래브에 대해서는 Fig. 4의 (a)의 경우가, 외부 슬래브에 대해서는 (f)의 경우가, 코너 슬래브의 경우 (g)의 경우가 가장 큰 값을 나타낸다. 따라서 최소 두께 역시도 (a), (f), (g)의 경우에 대체로 최소 두께가 가장 큰 값을 나타내므로, 앞서 기술한 바와 같이 (a), (f), (g)의 경우를 이용하여 설계식을 유도하였다. $k(\beta)$ 는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 근사적으로 Fig. 2(a)의 경우 1.54, (f)의 경우 2.16, (g)의 경우 $2.35\beta^{0.09}$ 의 값을 나타내므로 식(18)은 근사적으로 식(19)와 같이 간략히 할 수 있다.

$$(h_{\min})_{int} = 0.061 A^{2/5} Q \quad (\text{m}) \quad (19a)$$

$$(h_{\min})_{ext} = 0.086 A^{2/5} Q \quad (\text{m}) \quad (19b)$$

$$(h_{\min})_{cor} = 0.094 \beta^{-0.09} A^{2/5} Q \quad (\text{m}) \quad (19c)$$

일반적인 설계 변수가 최소 두께에 미치는 영향을 연구하기 위하여 다음과 같은 설계 변수에 대하여 3.2절에서 유도된 반복 계산 과정을 수행하였다. 즉, $l_n=4\sim 8\text{m}$, $f_{cu}(t)=15\sim 35\text{MPa}$, $\alpha=0.6\sim 0.9$, $\beta=1.0\sim 2.0$, $(LR)_{con}=1.5\sim 2.5$, $(LR)_{sus}=1.1\sim 1.5$.

Fig. 6과 Fig. 7은 내부 슬래브 Fig. 4(a)와 외부 슬래브 Fig. 4(f)에 대해 최소 두께의 해석 결과와 주요 변수 Q 의 관계를 나타내고 있는데, 허용 처짐 $l/240$, $l/480$ 일 때 대해 모두 최소 두께가 변수 Q 와 선형으로 비례하는 관계가 있음을 보여주고 있다.

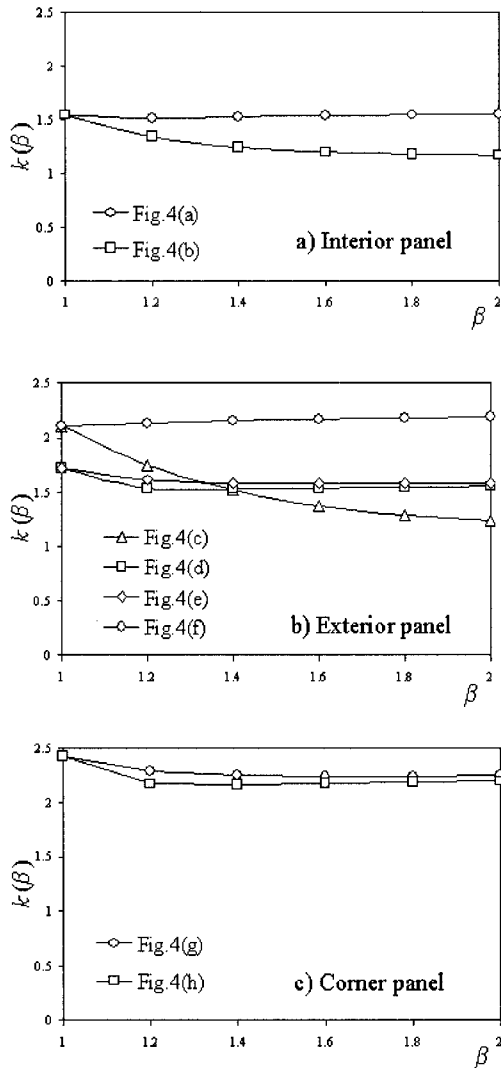


Fig. 5 Effect of aspect ratio on the minimum thickness

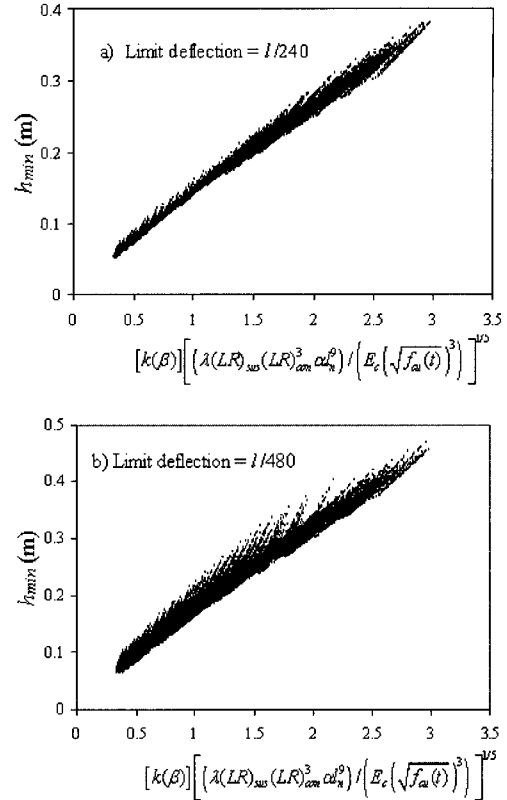


Fig. 6 Variations of minimum thickness for interior panel in terms of Q

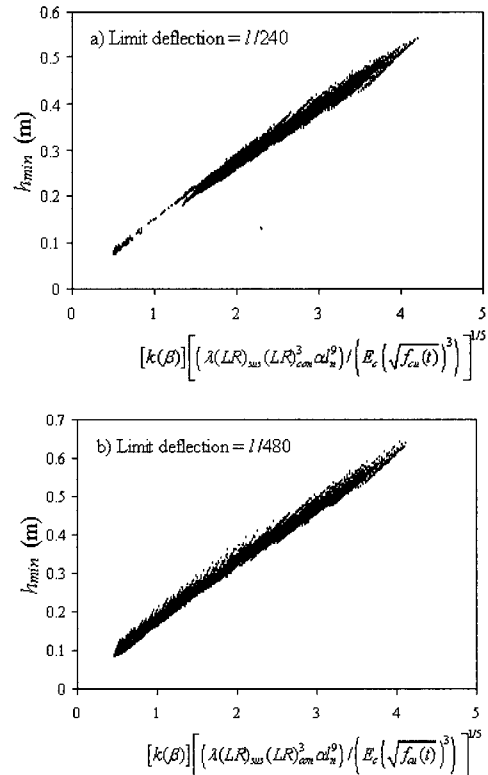


Fig. 7 Variation of minimum thickness for exterior panel in terms of Q

Table 5 Coefficients in Eq. (20)

	Limit deflection	D	E
Interior panel	l/240	0.19	0.019
	l/480	0.23	0.023
Exterior panel	l/240	0.26	0.030
	l/480	0.32	0.023
Corner panel	l/240	0.28	0.020
	l/480	0.35	0.025

Table 6 Load history of Gardner's experiment

	L/D	28-day capacity	D(kPa)	Day4	Day7	Day10	Day28
Slab 1	1.0	3.1D	1.82	0.85D	2D	2D	D+L/2 = 1.5D
Slab 2	0.5	2.25D	2.52	0.60D	2D	2D	D+L = 1.5D

식(19)는 모든 단면에 균열이 발생한 경우의 변수인 Q에 의하여 정의되므로 상대적으로 균열이 많이 발생하는 $\delta_{lim} = l/240$ 인 경우에는 최소 두께와 변수 Q가 밀접한 관계를 나타내는 반면, 상대적으로 균열이 적은 $\delta_{lim} = l/480$ 인 경우에는 연관성이 다소 떨어진다.

Fig. 6과 7에 나타난 해석 결과에 근거하여 본 연구에서는 플랫 플레이트 최소 두께의 설계식으로서 식(20)을 제안하였다.

$$h_{min} = D \left[\frac{\lambda(LR)_{sus} (LR)_{con}^3 \alpha l_n^\beta}{E_c (\sqrt{f_{cu}(t)})^3} \right]^{1/5} + E \quad (20)$$

구속 조건과 허용 처짐에 따른 상수 D, E는 Table 5에 나타나있다.

5. 제안식의 검증

최소 두께 제안식의 유효성을 검토하기 위해서는 이 식의 바탕이 되는 처짐 계산 방법이 검증되어야 한다. 처짐 계산방법을 검증하기 위해서는 실제 지주 계획과 공사기간을 고려한 다양한 실험 결과와 비교하여야 하나, 이러한 실험이 거의 없을 뿐 아니라 보고된 실험에서도 실험체의 구속 조건에 대한 정확한 정보가 없어 실험체의 경계 조건을 수계산에 정확히 반영하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 Gardner⁵⁾의 실험 결과와 비교하여 검증된, 참고문헌 12에서 개발된 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 제안식의 유효성을 검증하고자 한다.

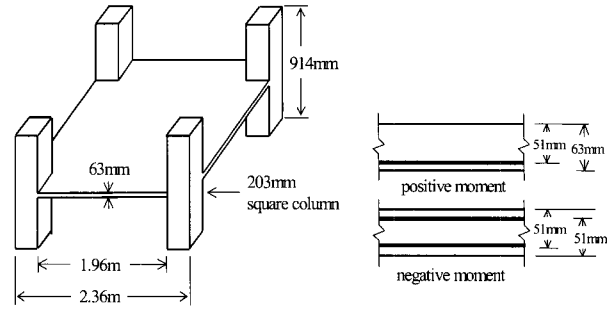


Fig. 8 Gardner's slab specimen

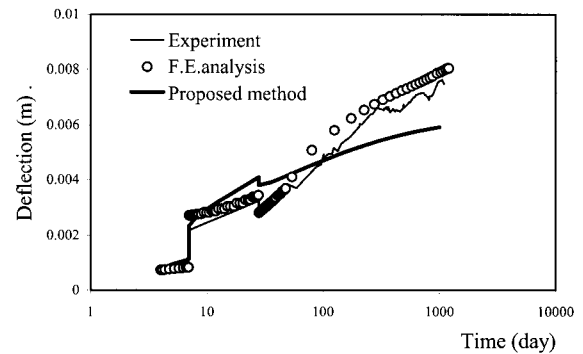


Fig. 9 Comparison with experiment performed by Gardner

Fig. 8은 Gardner의 실험체를 나타내고 있다. 실험체의 슬래브 치수는 2.36m×2.36m, 두께는 63mm이고, 기둥의 단면 치수는 203mm×203mm이다. 철근의 항복 강도는 417MPa이며, 부모멘트 영역에서의 철근비는 0.00253, 정모멘트 영역에서 중간대의 철근비는 0.00253, 주열대의 철근비는 0.00507이다. 실험의 하중 이력은 Table 6에 나타나 있다.

Fig. 9는 Gardner의 실험 중 슬래브2의 실험 결과와 참고문헌 12에서 개발된 유한 요소 해석에 의한 결과, 그리고 본 연구에서 제시된 처짐 계산 방법에 의한 결과를 비교하고 있다.

실험에서는 기둥이 어느 정도 휨강성을 발휘한다. 따라서 본 연구에서는 유한 요소 해석을 통해 슬래브 처짐에 대한 기둥의 휨강성 기여도를 구한 후 이를 처짐 계산 방법에 반영하였다. 그림에 나타난 바와 같이 제안된 처짐 계산 방법은 즉시 처짐은 잘 나타내고 있으나 장기 처짐은 실험 결과와 유한 요소 해석 결과를 저평가하고 있다. 비선형 유한 요소 해석에서는 크리프 계수로서 BP모델¹²⁾을 사용하였으며, 처짐 계산식에서는 ACI 크리프 모델⁴⁾을 사용하고 있는데, 참고문헌 12에 비롯하여 여러 연구자들에 의하여 ACI 크리프 모델이 장기 처짐을 저평가하는 것으로 보고되고 있다.

Table 7 Verification of the proposed method for calculating deflections

		F.E. analysis		Proposed method		Comparison	
		Immediate deflection (mm) (1)	Long-term deflection (mm) (2)	Immediate deflection (mm) (3)	long-term deflection (mm) (4)	(3)/(1)	(4)/(2)
$c^{(1)}=7$	m=2	6.6	40.9	6.3	31.2	0.96	0.76
	m=3	6.3	40.8	6.0	30.2	0.95	0.74
	m=4	6.2	40.3	6.0	30.1	0.97	0.75
	m=6	6.1	39.8	5.9	29.9	0.97	0.75
$m^{(2)}=2$	c=3	8.2	46.7	8.8	41.2	1.07	0.88
	c=4	7.5	44.1	7.8	36.9	1.04	0.84
	c=5	7.1	42.7	7.1	34.4	1.01	0.81
	c=6	6.8	42.0	6.6	32.5	0.97	0.77
	c=7	6.6	40.9	6.3	31.2	0.96	0.76

Span (m) = 6.65×6.65, Column (m) = 0.65×0.65 / $f_{ck} = 24$ MPa, $f_y = 400$ MPa

1) : Construction cycle (days), 2) : Number of shored floors

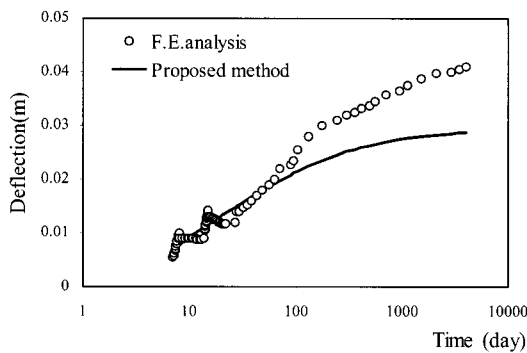


Fig. 10 Comparison of long-term deflection calculated by F.E. analysis and proposed method

시공하중과 연관된 설계변수에 대한 검증을 위하여 유한 요소 해석과 처짐 계산식을 비교하였다. 해석 모델은 경간 6.65m×6.65m, 기둥 크기 0.65m×0.65m, $f_{ck}=24$ MPa, $f_y=400$ MPa이며, 철근비로서 주열대 부모멘트에서 0.00573, 주열대 정모멘트에서는 0.00267, 중간대는 0.002를 사용하였다.

Table 7은 다양한 지주 계획과 층 공사 주기 계획에 대하여 해석결과와 처짐 계산식을 비교하고 있으며, Fig. 10은 2개 층의 지주와 7일 층 공사 주기를 사용할 때 슬래브의 처짐 이력을 비교하고 있다. 표와 그림에 나타난 바와 같이 처짐 계산식은 유한 요소 해석 결과보다 장기 처짐을 약 12~25% 저평가하는 것으로 나타나 있다.

실험 및 유한 요소 해석과의 비교에서 나타나 있듯이 ACI 크리프 모델은 장기 처짐을 저평가하므로 본 연구에서 제안된 식(20)도 최소 두께를 저평가할 수 있다. 따라서 정확한 최소 두께를 평가하기 위해서는 장기 처짐을 잘 나타낼 수 있도록 ACI 모델의 크리프 계수를 증가시

켜야 한다. 반면에 슬래브의 처짐은 사용성의 문제이므로, 일반적으로 사용강도보다 작은 설계강도를 사용하여 지나치게 안전측으로 평가할 필요는 없다. 따라서 Asamoah의 제안과 같이(Table 1) 시공하중 재하시 사용강도를 사용하는 것이 바람직하다.

6. 현행 설계 기준과 비교

현행설계기준과의 비교를 위하여 다양한 설계하중 및 시공계획에 대하여 순경간이 5m, 6m 인 내부, 외부, 코너 슬래브의 최소두께를 계산하였다. Fig. 11, 12, 13은 반복 계산을 사용하여 구한 최소 두께, 최소두께에 대한 제안 식(20), 그리고 현 설계 기준 (지판이 없고 $f_y=400$ MPa인 경우, 내부 슬래브 = $l_n/33$, 외부 슬래브 = $l_n/30$)을 비교하고 있다. 현 설계 기준에는 코너 슬래브의 최소 두께에 대한 규정이 없으므로 외부 슬래브에 대한 현 설계 기준의 최소 두께 $l_n/30$ 과 비교하였다.

현행 설계 기준은 한 경간에 대하여 일정한 슬래브 최소 두께를 나타내는 반면, 반복 계산을 통해 구한 최소 두께는 경간 외의 다른 여러 설계 변수의 영향이 반영되어 있으므로, 같은 경간에서도 다양한 값을 나타내고 있다. 순경간이 5m이고, 내부 슬래브인 경우, 현행 설계 기준에 따른 최소 두께는 대부분의 경우 사용성을 만족한다고 할 수 있으나, 허용 처짐이 $l/480$ 인 외부 슬래브의 경우와 코너 슬래브의 경우 사용성을 만족시키지 못하는 경우가 지배적이다. 순경간이 6m로 늘어나게 되면, 현행 설계 기준의 최소 두께는 허용 처짐이 $l/480$ 인 경우 사용성을 만족하기 어렵다. 일반적인 주거 건물에서는 허용 처짐 $l/480$ 을 만족해야 한다는 점을 고려한다면 현행 설계 기준이 안전측이 아니라는 것을 알 수 있다.

Fig. 14, 15, 16은 경간, 시공 중 지주 지지 층 수, 층 공 사 주기가 내부 슬래브의 최소 두께에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 14에 나타나 있듯이 경간에 따라 l_n/h_{min} 이 일정한 현행 설계 기준과 달리 경간이 늘어날수록 l_n/h_{min} 이 작아진다. 이는 경간이 늘어날수록 현행 설계 기준이 제안하는 비율보다 더 큰 비율로 두께가 증가되어야 함을 의미한다. 또한 Fig. 15와 16에 나타난 바와 같이 지주로 지지하는 층 수가 작을수록, 그리고 층 당 공기가 작을수록 슬래브 두께가 증가되어야 함을 보여주고 있다.

설계 예로서 경간 6m×6m, 기둥 0.5m×0.5m의 외부 슬래브를 30MPa의 콘크리트와 400MPa의 철근을 사용하여 3개 층을 지주로 지지하고, 3일에 1개층씩 타설하고자 한다. Table 3에 나타나 있듯이 슬래브의 휨균열에 가장 큰 영향을 미치는 시공 하중은 슬래브 자중의 1.74배이고 첫 시공 하중이 재하 되는 3일의 콘크리트 강도는 15.08 MPa,

콘크리트 탄성계수는 16.83 GPa이다. 장기 처짐 계수 λ 에 대해서는 참고문헌 4, 5에 ACI 318 뿐만 아니라 여러 연구자들이 제안하는 값이 나와 있는데, ACI 318은 앞서도 언급하였듯이 장기 처짐을 저평가하므로 참고문헌 5에서 Sbarounis와 Scanlon이 제안하는 $\lambda = 4$ 와 ACI에서 제안하는 $\lambda = 2$ 를 이용하여 그 결과를 비교하였다. 또한 칸막이, 마감 등을 포함한 지속 하중의 크기를 슬래브 자중의 1.4배로 가정하면 식(20)으로부터 사용성을 만족하는 최소 두께는 $\lambda = 4$ 일때, 허용 처짐이 $l/240$ 인 경우 202.4 mm, 허용 처짐이 $l/480$ 인 경우는 235.2mm이다. 또한 $\lambda = 2$ 일때, 허용 처짐이 $l/240$ 인 경우 180.1m, 허용 처짐이 $l/480$ 인 경우는 207.7mm이다. 반면 현행 설계 기준의 최소 두께는 183.33mm이므로, 현행 설계 기준의 최소 두께는 허용 처짐을 만족시킬 수 없다. 따라서 슬래브 두께를 현행 설계 기준 보다 크게 하거나 시공 계획을 재검토해야 한다.

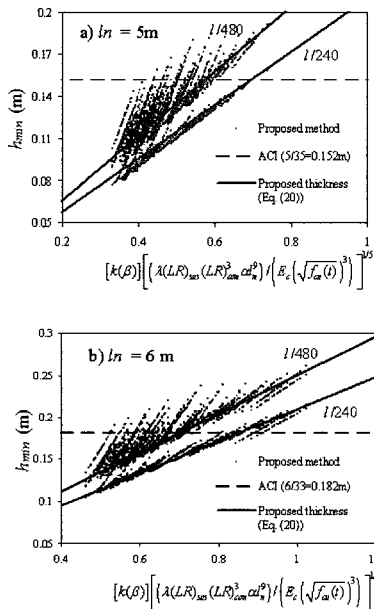


Fig.11 Comparison of the proposed minimum thickness and ACI (interior panels)

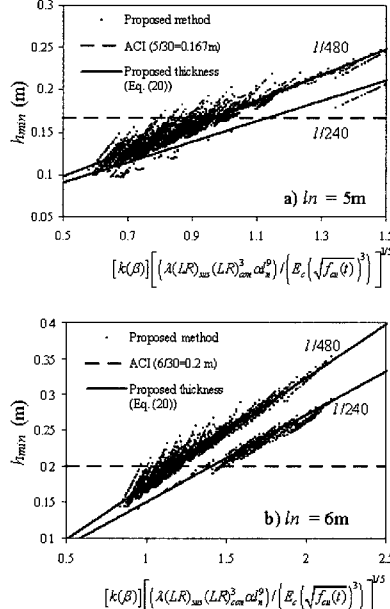


Fig.12 Comparison of the proposed minimum thickness and ACI (exterior panels)

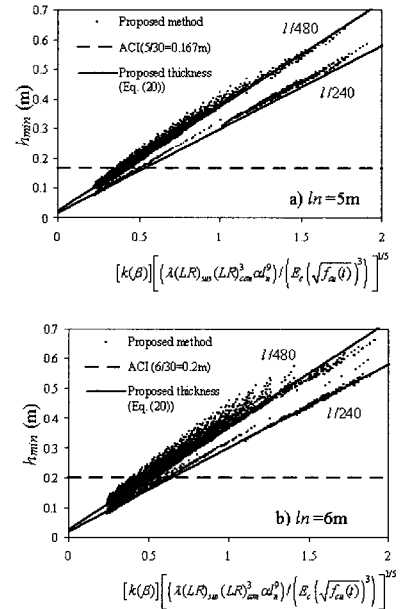


Fig.13 Comparison of the proposed minimum thickness and ACI (corner panels)

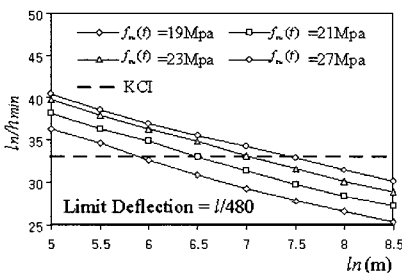


Fig.14 Effect of span length on span-to-depth ratio

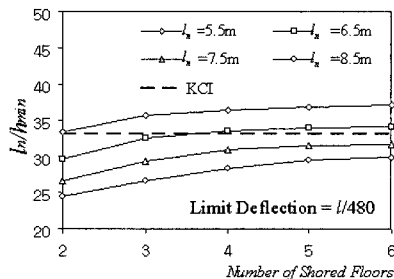


Fig.15 Effect of number of shored floors on span-to-depth ratio

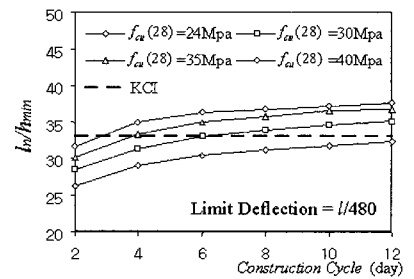


Fig.16 Effect of construction cycle on span-to-depth ratio

시공 중에는 시공 하중의 영향으로 인하여 슬래브에 재하되는 하중이 슬래브 자중의 두 배에 달하며, 또한 콘크리트 재령이 충분치 않으므로 구조 안전성의 문제와 장기 처짐, 균열 등 사용성의 문제를 일으킬 수 있다. 현행 설계 기준에서 제시하고 있는 플랫 플레이트에 대한 최소 두께의 규정은 경간에 의하여 결정되므로 이러한 시공 하중의 영향을 고려할 수 없다. 본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 플랫 플레이트의 영향과 장기 처짐의 영향을 고려할 수 있는 처짐 계산 방법을 개발하였다. 이 계산 방법을 기초로 하여 플랫 플레이트의 최소 두께 산정을 위한 설계식을 제안하였다. 최소 두께 제안식의 유도 과정에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 시공 하중의 크기뿐만 아니라 초기재령 콘크리트 강도에 영향을 미치는 시공 하중의 재하 시기가 시공 중 구조 안전성 및 균열, 처짐에 더욱 치명적일 수 있다.
- 2) 슬래브의 처짐 및 최소 두께는 슬래브의 기하학적 형상, 경계 조건, 시공 하중 재하시의 콘크리트 강도, 시공 하중 및 지속 하중의 크기 등의 영향을 받는다.
- 3) 기존의 실험 및 비선형 유한 요소 해석과 비교 결과 ACI 크리프 모델은 장기 처짐을 저평가 하였고, 이에 따라 제안식 역시도 슬래브의 처짐과 최소 두께를 저평가할 수 있는 것으로 나타났다.
- 4) 현행 설계 기준에서는 코너슬래브의 최소두께에 대한 규정이 없으나 코너슬래브에서 가장 큰 처짐이 발생하였으며, 따라서 코너슬래브에 대한 별도의 최소두께의 규정이 필요하다.
- 5) 제안식과 기존 설계식에 의한 최소 두께를 비교한 결과, 기존 설계식에 의한 최소 두께는 내부 슬래브의 경우 대체로 허용 처짐 $l/240$ 을 만족하고 있으나 $l/480$ 은 만족시키지 못했다. 외부와 코너 슬래브의 경우 내부 슬래브보다 더욱 안전측이지 못하여 허용 처짐 $l/240$ 도 대체로 만족시키지는 못하는 것으로 나타났다.
- 6) 현행 설계 기준은 경간이 길수록 허용 처짐을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 동부건설의 재정적 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

요 약

시공 중에는 시공 하중의 영향으로 인하여 슬래브에 재하되는 하중이 슬래브 자중의 두배 이상에 달하며, 또한 콘크리트 재령이 충분치 않으므로 구조 안전성의 문제와 장기 처짐, 균열 등 사용성의 문제를 일으킬 수 있다. 현행 설계 기준에서 제시하고 있는 플랫 플레이트에 대한 최소 두께의 규정은 이러한 시공 하중의 영향을 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 기존 연구를 토대로 슬래브의 기하학적 형상, 경계 조건, 콘크리트 강도, 시공 하중 등의 영향을 고려할 수 있는 플랫 플레이트의 처짐 계산 방법을 개발하였으며, 이 방법을 기초로 하여 플랫 플레이트에 대한 최소 두께식을 제안하였다.

핵심용어 : 플랫 플레이트, 처짐, 최소 두께, 시공 하중

1. 한국콘크리트학회, 건설교통부, “콘크리트구조설계기준”, 1999년.
2. American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Structural Concrete,” *ACI 318-02*. pp.95~108, pp.213~232.
3. Asamoah, K. O. and Gardner, N. J. “Flat Slab Thickness Required to Satisfy Serviceability Including Early Age Construction Loads,” *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 6, November 1997, pp.700~707.
4. ACI Committee 435, “State-of-the-Art Report on Control of Two-Way Slab Deflections,” *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 4, July 1991, pp. 501~514.
5. Gardner, N. J. and Fu, H. C., “Effect of High Construction Loads on the Long-Term Deflections of Flat Slabs,” *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 4, July 1987, pp.349~360.
6. Thompson, D. P. and Scanlon A., “Minimum Thickness Requirements for Control of Two-Way Slab Deflections,” *ACI Structural Journal*, Vol. 85, No. 1, January 1988, pp.12~22.
7. Rangan B. V., “Estimation of Slab Deflections in Flat Plate Buildings,” *ACI Journal, Proceedings* Vol. 83, No. 2, March 1986, pp.269~273.
8. Grundy, P. and Kabaila, A., “Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings,” *ACI Journal, Proceedings* Vol. 60, No. 12, Dec. 1963, pp.1729~1738.
9. Mosallam, K. H. and Chen, W. F., “Modified Simplified Method,” *Concrete Buildings*, Chapter 4, 1991, pp.123~133.
10. 건설교통부, 한국콘크리트학회, “콘크리트구조 표준시방서”, 2000년.
11. 한상훈, 김진근, 양은익, “콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과”, 콘크리트학회논문집, 제12권 6호, 2000년 12월, pp.35~42.
12. 최경규, 박홍근, “바닥 하중과 압축력을 받는 플랫 플레이트의 장기 거동을 고려한 모멘트 증대법”, 콘크리트학회논문집, 제13권 1호, 2000년 2월, pp.38~45.