



## 시공하중 및 균열 효과를 고려한 플랫 플레이트의 처짐 산정

김재요<sup>1)</sup> · 임주혁<sup>2)</sup> · 박흥근<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>광운대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>삼성물산(주) 건설부문 주택ENG팀 <sup>3)</sup>서울대학교 건축학과

## Calculations of Flat Plate Deflections Considering Effects of Construction Loads and Cracking

Jae-Yo Kim,<sup>1)</sup> Ju-Hyeuk Im,<sup>2)</sup> and Hong-Gun Park<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

<sup>2)</sup>Housing Eng. Team, Samsung Engineering and Construction, Seoul 137-956, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

**ABSTRACT** The structural designs of RC flat plates that have insufficient flexural stiffness due to lack of support from boundary beams may be governed by serviceability as well as a strength criteria. Specially, since over-loading and tensile cracking in early-aged slabs significantly increase the deflection of a flat plate system under construction, a construction sequence and its impact on the slab deflections may be decisive factors in designs of flat plate systems. In this study, the procedure of calculating slab deflections considering construction sequences and concrete cracking effects is proposed. The construction steps and the construction loads are defined by the simplified method, and then the slab moments, elastic deflections, and the effective moment of inertia are calculated in each construction step. The elastic deflections in column and middle strips are magnified to inelastic deflections by the effective moment of inertia, and the center deflection of slab are calculated by the crossing beam method. The proposed method is verified by comparisons with the existing test result and the nonlinear analysis result. Also, by applications of the proposed method, the effects of the slab construction cycle and the number of shored floors on the deflections of flat plates under construction are analyzed.

**Keywords :** flat plate, deflection, construction load, crack

### 1. 서 론

플랫 플레이트 바닥 구조는 층고 절감 및 시공성 향상, 공간 활용성 향상이라는 장점에도 불구하고, 작은 휨강성으로 인하여 강도뿐만 아니라 처짐에 의해 부재 설계가 지배받을 수 있어 적용에 주의가 요구된다. 특히 시공하중의 큰 영향을 받을 수 있으며, 동바리를 통하여 전달되는 슬래브 자중 및 시공하중으로 인하여 초기 재령의 슬래브에 과도한 하중이 작용함으로써, 구조 안전성뿐만 아니라 장단기 사용성에도 영향을 미칠 수 있다.<sup>1,2)</sup> 완전히 경화되지 않은 슬래브에 발생한 이러한 초기 손상은 슬래브 경화 후에도 존재함으로써 슬래브 자중 및 마감하중, 적재하중 등에 의한 즉시 처짐은 물론 장기 거동에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 계획 및 시공 과정에 시공 하중 및 구조 안전성/사용성에 영향을 줄

수 있는 영향 요소들에 대한 고려들이 포함되어야 하며, 설계 및 해석에서의 가정들이 성립할 수 있도록 시공과정에 대한 지속적인 조절 프로그램이 계획되어야 한다.

시공 중 플랫 플레이트 구조에 발생하는 손상 및 처짐을 분석하기 위해서는 시공단계를 고려한 슬래브 처짐 산정법이 사용되어야 한다. 일반적으로 타설된 슬래브 콘크리트는 완전히 경화하기까지 자신의 강도 및 강성을 충분히 발휘할 수 없으므로, 타설 후 일정 기간 동안에는 자중을 스스로 지탱하지 못하고 동바리로 연결된 하부 층으로 자중의 전체 혹은 일부를 전달하게 된다. 시공 중 타설 시점이 다양한 여러 층 슬래브들이 하나의 시스템을 구성하고, 이 시스템은 인접 층 슬래브들을 연결하는 동바리들에 의해 결합되어 있다. 이 때, 동바리로 연결된 바닥구조 시스템에서, 하부 층으로 갈수록 작용하는 시공하중이 증가하며, 최대 시공하중은 1개 층 슬래브 자중의 2배가 넘는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 그러나 시공 중 슬래브 콘크리트는 경화되고 있는 과정이므로, 강성 및 강도가 지속적으로 변화하여, 단순히 시공하중의 크기만으로 슬래브의 처짐과 손상을 평가할 수는 없다. 시공 단계에 따라 변화하는 시공하중의 크기와 함께,

\*Corresponding author E-mail : parkhg@snu.ac.kr

Received July 30, 2009, Revised September 7, 2009

Accepted September 14, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

시공하중 작용시점들마다 변화하는 슬래브 콘크리트의 강도와 강성을 함께 고려하여 처짐을 산정할 수 있어야 한다. 이를 위하여, 시공하중과 강도 및 강성의 발현, 균열에 따른 유효단면강성 저하 효과를 고려하여, 시공 단계별로 처짐을 산정하는 과정이 개발되어야 한다. 플랫 플레이트의 처짐에 대한 기존의 연구들<sup>4,5)</sup>에서는 이러한 시공단계 효과를 고려하지 않고, 특정 시점에 대한 처짐 산정 과정만을 제시하고 있다.

이 연구에서는 시공 단계에 따라 변화하는 시공하중과 재료성질을 종합적으로 고려하여 시공 중 플랫 플레이트 처짐 변화를 산정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여, 시공하중 변화에 따른 시공단계를 정의하고, 시공단계별로 콘크리트 강성 발현에 따른 탄성처짐값을 누적하여 균열에 따른 비탄성처짐값으로 증폭하는 계수를 적용하는 시공단계처짐해석 과정을 제안한다. 이때 각 시공단계에서 정의되는 슬래브 탄성처짐값 및 유효단면강성값은 기존의 설계기준 또는 지침에 제시되어 있는 설계기준식들을 적용함으로써, 수식 전개를 통한 실용적인 슬래브 처짐해석 과정을 제안하고자 한다. 또한 제안된 시공단계처짐해석법을 적용하여, 시공주기 및 동바리 지지 층 수에 따른 플랫 플레이트의 처짐 변화를 비교함으로써, 슬래브 처짐에 대한 시공단계 효과를 분석한다.

## 2. 시공단계별 슬래브 처짐 산정법

시공하중에 의한 플랫 플레이트 처짐 영향을 분석하기 위하여, 시공단계별 슬래브 처짐 산정과정을 제시한다. 시공 중 과하중에 의하여 발생하는 균열에 의한 슬래브의 단면강성 저하를 고려하며, 시공 작업의 진행에 따른 시공하중의 지속적인 변화를 반영하기 위하여 시공단계별 작용하중의 변화에 따른 처짐값의 변화를 산정하는 과정을 적용한다. 탄성모멘트 및 처짐에 적절한 계수를 적용하고, 최대모멘트에 의한 유효단면2차모멘트값을 정의함으로써, 시공단계별 슬래브 처짐값을 산정하는 과정을 제시한다.

### 2.1 시공 중 처짐 분석

일반적으로 슬래브 처짐 산정과정에 가장 큰 영향을 주는 요인은 시공하중의 크기, 슬래브 탄성계수, 슬래브 균열 및 유효단면강성이다. 시공하중의 크기 및 슬래브 탄성계수는 시공단계별 입력변수로 주어지는 값이며, 슬래브 균열 및 유효단면강성은 각 시공단계별 작용 하중에 따른 모멘트와 슬래브 재령별 콘크리트 강도, 슬래브 두께 및 철근비 등에 의하여 결정된다. 이 연구에서 제시하는 처짐해석법에서는 각 시공단계별 탄성계수와 시공하중의 비율에 따른 계수 및 유효단면2차모멘트값 변화에 따른 증폭계수를 적용하여 탄성처짐값으로부터 직접 슬래브 처짐값을 산정하는 과정을 제시한다.

플랫 플레이트의 중앙부 처짐값은 교차보법(crossing beam method)<sup>4,7)</sup>에 의하여 산정한다. 교차법에서는 각 방향의 주열대와 중간대를 연속보로 간주하고 각각의 처짐을 계산하여 중첩함으로써, 슬래브 중앙부의 처짐을 산정할 수 있다. 슬래브 주열대와 중간대의 처짐은 주열대와 중간대의 각 모멘트에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$\delta = \frac{5}{48} \frac{l_n^2}{E_c I_g} [M_m + 0.1(M_1 + M_2)] \quad (1)$$

여기서  $l_n$ 은 모멘트가 결정되는 방향의 순경간 길이이며,  $E_c$ 는 슬래브 콘크리트의 탄성계수,  $I_g$ 는 슬래브의 전단면 2차모멘트이다. 또한  $M_m$ 은 중앙부의 단위 폭당 모멘트이며,  $M_1$ 과  $M_2$ 는 양 단부의 단위 폭당 모멘트이다.

슬래브 중앙부의 처짐은 주열대 등가보의 처짐과 중간대 등가보의 처짐을 중첩시켜 다음과 같이 구할 수 있다(Fig. 1).

$$\delta_{mp} = \delta_c + \delta_m \quad (2)$$

여기서  $\delta_{mp}$ 는 슬래브 중앙부 처짐값이며,  $\delta_c$ 와  $\delta_m$ 은 각각 주열대와 중간대의 처짐값으로서 식 (1)에 의하여 계산된다. 이와 같이, 각 시공단계에서의 탄성처짐 증가값은 모멘트 증가에 따라 식 (1)과 (2)에 의하여 산정될 수 있다.

콘크리트 균열 효과를 고려할 경우, 슬래브의 처짐은 탄성처짐에 비해 크게 증가한다. 단면조건 및 탄성계수 등의 재료조건이 동일할 경우, 슬래브의 탄성처짐  $\delta_0$ 와 비탄성처짐  $\delta$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta_0 = \frac{kwL^4}{E_c I_g} \quad \text{and} \quad \delta = \frac{kwL^4}{E_c I_e} \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 슬래브의 기하학적 조건 및 단부 조건에 따라 결정되는 계수이며,  $w$ 는 슬래브에 작용하는 바닥하중,  $L$ 은 슬래브 한 변의 길이이다. 결국, 슬래브 탄성처짐과 비탄성처짐은 균열에 따른 유효단면2차모멘트값  $I_e$ 와 전단면 2차모멘트값  $I_g$ 의 비에 의해 표현될 수 있다.

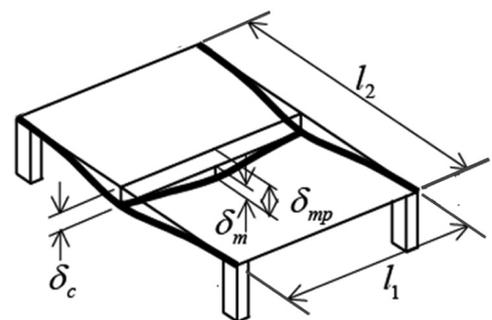


Fig. 1 Crossing beam method

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{I_g}{I_e} \quad (4)$$

따라서 슬래브의 유효단면2차모멘트값이 적절하게 산정될 수 있다면, 탄성처짐값을 이용하여 균열효과를 고려한 슬래브의 처짐값을 산정할 수 있다. 이때 시공단계의 효과를 고려할 경우, 시공단계마다 슬래브 콘크리트의 탄성계수값이 변화하므로, 각 단계별로 시공하중 증가에 따른 탄성처짐 증가값을 산정하여 누적함으로써 해당 시공단계의 총 탄성처짐값을 산정하여야 한다. 또한 각 시공단계에서 균열에 의한 유효단면강성의 저하는 해당 시공단계에 작용하는 전체 시공하중에 의해 영향을 받으므로, 해당 시공단계까지의 총 탄성처짐값을 해당 시공단계에서의 유효단면강성비  $I_g/I_{e,i}$ 값만큼 증폭하여 비탄성처짐값으로 환산하는 산정과정을 적용할 수 있다:

$$\delta_i = \left\{ \sum_{k=1}^i \Delta\delta_{e,k}(\Delta W_k, E_{c,i}) \right\} \times \frac{I_g}{I_{e,i}} \quad (5)$$

여기서  $\Delta\delta_{e,i}$ 는  $i$ 단계의 콘크리트 접선계수  $E_{c,i}$ 와 전단면 2차모멘트  $I_g$ 를 사용하여 산정되는 하중증가  $\Delta W_i$ 에 의한 슬래브의 탄성처짐 증가값이며, 이를 누적한 값은  $i$ 단계에서의 유효단면강성비  $I_g/I_{e,i}$ 에 의하여 비탄성처짐값  $\delta_i$ 로 환산된다.

ACI-318<sup>8,9)</sup>은 휨부재의 균열에 따른 유효단면강성저하를 고려하기 위하여 다음과 같은 유효단면2차모멘트 산정식을 제시하고 있다.

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (6)$$

여기서  $M_{cr}$ 은 콘크리트의 휨균열을 발생시키는 균열모멘트이고,  $M_a$ 는 슬래브 작용 모멘트이다.  $I_g$ 는 철근을 무시한 콘크리트 전체 단면의 중심축에 대한 단면 2차모멘트이고,  $I_{cr}$ 은 균열 단면의 단면 2차모멘트이다. 그러나 Bischoff and Scanlon<sup>10)</sup>은 다양한 실험을 통해 이 식이 주철근비가 작은 경우 유효단면2차모멘트값을 크게 산정하는 경향이 있다고 밝히고, 슬래브와 같이 철근비 1% 미만의 휨부재에 적합한 유효단면강성식을 제시하였다.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[ 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \quad (7)$$

단순지지 부재의 경우, 최대 정모멘트를 식 (7)에 대입하여 부재의 유효단면2차모멘트를 직접 산정할 수 있으나, 연속지지인 경우 양단의 부모멘트와 중앙부 정모멘트에 의한 유효단면2차모멘트를 각각 산정한 후, 다음 식에 의하여 부재 전체의 유효단면2차모멘트값( $I_{ea}$ )을 계산한다.<sup>11)</sup>

$$I_{ea} = [(I_{e1} + I_{e2})/2 + I_{em}]/2 \quad (8)$$

여기서  $I_{e1}$ 과  $I_{e2}$ 는 양단 연속부재의 양 단부 부모멘트에 의한 유효단면2차모멘트값이며,  $I_{em}$ 은 중앙부 정모멘트값을 식 (7)에 대입하여 산정한 유효단면2차모멘트값이다.

## 2.2 슬래브 처짐 산정 과정

“2.1 시공 중 처짐 분석”에 제시된 가정들을 바탕으로, 시공 중 슬래브 처짐 산정의 전 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 주요 시공단계를 정의하고, 슬래브 시공주기 및 동바리 지지 층 수를 고려하여 시공단계별 시공하중을 산정한다.
- 2) 슬래브 자중(DL)에 의한 플랫 플레이트에서의 모멘트를 산정한다. 플랫 플레이트 각 지점의 단위 폭당 모멘트는 직접설계법<sup>8,9)</sup>에 따라 다음 식과 같이 정의한다.

$$M = \alpha \frac{w l_n^2}{4} \quad (9)$$

여기서  $\alpha$ 는 슬래브 각 지점에 따라 결정되는 변수로서, 플랫 플레이트 구조의 경우 Table 1과 같이 결정된다.<sup>8,9)</sup>

- 3) 슬래브 자중(DL) 및 28일 재료강성( $E_c$ )을 적용한 플랫 플레이트 탄성 처짐값을 산정한다. 전단면 2차모멘트( $I_g$ )를 적용한 슬래브의 주열대 및 중간대의 처짐값  $\delta_{ce}$ 와  $\delta_{me}$ 를 식 (1)에 의하여 각각 계산한다.

- 4) 각 시공단계별 탄성 처짐 증가값과 모멘트값을 정의한다. 탄성 처짐값은 작용하중 및 재료강성과 선형적인 관계이며, 탄성 모멘트값 역시 작용하중과 선형적인 관계이다. 따라서, 슬래브 자중(DL) 및 28일 재료강성( $E_c$ )에 의한 결과에 해당 시공단계의 시공하중 및 재령에 따른 탄성계수<sup>11)</sup>를 비례적으로 적용하여, 각 시공단계별 모멘트값과 탄성 처짐 증가값을 산정할 수 있다:

$$M_i = M(DL) \times LF_i \quad (10)$$

$$\Delta\delta_{ce,i} = \delta_{ce}(DL, E_c) \times \Delta LF_i \times \frac{E_c}{E_{c,i}} \quad (11a)$$

$$\Delta\delta_{me,i} = \delta_{me}(DL, E_c) \times \Delta LF_i \times \frac{E_c}{E_{c,i}} \quad (11b)$$

**Table 1** Factors for bending moments in flat plates

Location		Column strip	Middle strip
Interior span	Negative moment	0.49	0.16
	Positive moment	0.21	0.14
Exterior span	Interior negative moment	0.53	0.18
	Positive moment	0.31	0.21
	Exterior negative moment	0.26	0

여기서  $LF_i$ 는  $i$ 단계에 작용하는 시공하중을 의미하며, 슬래브 1개 층 자중( $DL$ )에 대한 비를 나타내는 계수이다.  $\Delta LF_i$ 는  $i$ 단계에서의 시공하중비의 증가값이다.

5) 식 (10)을 이용하여 산정된 각 시공단계별 작용모멘트( $M_i$ )와 콘크리트 압축강도 및 균열모멘트를 고려하여, 식 (7)과 (8)에 의하여 시공단계별 유효단면2차모멘트( $I_{e,i}$ )가 산정된다. 이 때, 주열대와 중간대에 대한 유효단면2차모멘트값  $I_{ce,i}$ 와  $I_{me,i}$ 가 각각 산정되어야 하며, 균열에 의하여 저하된 유효단면강성은 하중이 제거되더라도 회복되지 않는 것으로 가정하여, 이전 단계들의 유효단면2차모멘트값보다 작거나 같아지도록 적용된다.

6) 식 (11)을 이용하여 산정된 각 시공단계별 탄성 처짐 증가값( $\Delta\delta_{e,i}$ )을 누적하여, 총 탄성처짐값( $\delta_{e,i}$ )을 산정한다. 이 때, 주열대와 중간대에 대한 총 탄성처짐값  $\delta_{ce,i}$ 와  $\delta_{me,i}$ 가 각각 산정된다.

$$\delta_{ce,i} = \sum_{k=1}^i \Delta\delta_{ce,k} \quad \text{and} \quad \delta_{me,i} = \sum_{k=1}^i \Delta\delta_{me,k} \quad (12)$$

7) 각 시공단계별 총 탄성처짐값은 해당 시공단계의 유효단면2차모멘트( $I_{e,i}$ )와 전단면2차모멘트( $I_g$ )를 이용하여 비탄성 처짐값으로 증폭된다.

$$\delta_{ce,i} = \delta_{ce,i} \times \frac{I_{cg}}{I_{ce,i}} = \left( \sum_{k=1}^i \Delta\delta_{ce,k} \right) \times \frac{I_{cg}}{I_{ce,i}}$$

$$= \left\{ \sum_{k=1}^i \left( \delta_{ce}(DL, E_c) \times \Delta LE_k \times \frac{E_c}{E_{c,k}} \right) \right\} \times \frac{I_{cg}}{I_{ce,i}} \quad (13a)$$

$$\delta_{me,i} = \delta_{me,i} \times \frac{I_{mg}}{I_{me,i}} = \left( \sum_{k=1}^i \Delta\delta_{me,k} \right) \times \frac{I_{mg}}{I_{me,i}}$$

$$= \left\{ \sum_{k=1}^i \left( \delta_{me}(DL, E_c) \times \Delta LE_k \times \frac{E_c}{E_{c,k}} \right) \right\} \times \frac{I_{mg}}{I_{me,i}} \quad (13b)$$

8)  $i$ 단계에서 슬래브 중앙부의 처짐  $\delta_i$ 는 식 (2)의 교차보법에 의하여 주열대와 중간대 처짐의 합으로서 산정된다.

$$\delta_i = \delta_{c,i} + \delta_{m,i} \quad (14)$$

9) 시공단계별로 4)~8)의 과정을 반복한다. 이 때, 시공하중이 감소하는 경우, 처짐은 탄성 회복되는 것으로 가정한다.

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \delta_e(\Delta LF_i, E_{c,i}) \quad (15)$$

여기서  $\delta_e$ 는 시공하중 감소에 따른 하중변화  $\Delta LF_i$ 와 해당 시공단계의 탄성계수  $E_{c,i}$ 에 의해 결정되는 탄성처짐값으로서,  $\delta_e$ 와  $\Delta LF_i$ 는 음(-)의 값을 가진다.

### 3. 처짐 산정법 검증

“2. 시공단계별 슬래브 처짐 산정법”에서 제안된 처짐 산정법을 검증하기 위하여, 기존 연구문헌<sup>1)</sup>의 플랫 플레이트 처짐 실험 결과 및 기존 비선형해석법<sup>12)</sup>에 의한 해석결과와 비교를 수행한다.

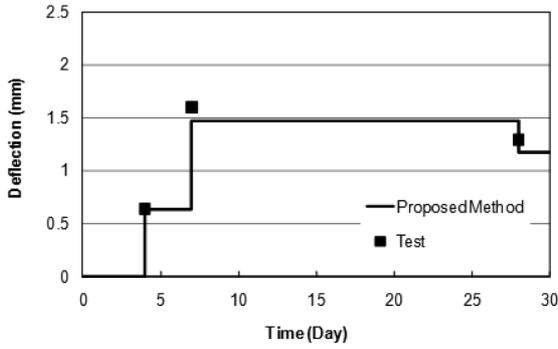
#### 3.1 실험 결과 비교

시공단계 효과를 고려한 처짐산정법의 유효성을 검증하기 위하여, 플랫 플레이트 처짐 실험 결과와 비교를 수행한다. Gardner and Fu<sup>1)</sup>는 순경간  $1.96 \text{ m} \times 1.96 \text{ m}$ , 두께  $63 \text{ mm}$ 인 플랫 플레이트에 대하여, 콘크리트 재령 초기에 작용하중을 변화하며 슬래브 처짐을 측정하였으며, 이에 대한 재료성질 및 철근비, 하중 조건 등은 Table 2와 같다. 하중 조건을 달리한 2개의 플랫 플레이트에 대한 실험이 수행되었는데, 두 슬래브 모두 콘크리트 재령 4일에 슬래브 자중( $DL$ )이 작용하였으며, 재령 7일에 Slab 1과 Slab 2에 각각  $1.45DL$ 과  $2.4DL$ 의 바닥하중이 추가로 재하되고, 재령 28일에 각각  $1.84DL$ 과  $2.55DL$ 로 재하된다.

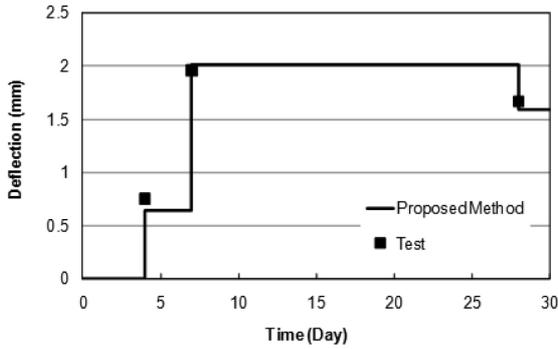
시공단계를 고려하여 “2. 시공단계별 슬래브 처짐 산정법”에서 제시된 산정과정에 따라 플랫 플레이트 중앙부 처짐을 산정한 결과와 실험에서 측정된 처짐 결과의 비교가 Fig. 2에 제시되어 있다. 이때 크리프 효과에 의한 장기처짐은 이 논문의 연구범위에 포함되지 않으므로 제외하였으며, 조기재령 슬래브에서의 시공하중 변화에 따른 처짐값의 변화만을 비교하였다. 두 시험체 모두 시공단계별 해석 결과와 측정 결과가 유사한 경향을 나타내었으며, 이 논문에서 제안한 시공단계별 처짐산정법의 유효성을 보여주고 있다.

**Table 2** Material properties and loading conditions of tests by Gardner and Fu<sup>1)</sup>

Concrete		Reinforcement			Loading condition					
Comp. strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Reinforcement ratio		Slab 1			Slab 2		
			Column strip	Middle strip	4-day	7-day	28-day	4-day	7-day	28-day
$f_{ck}$	$E_c$									
45.5	38,500	417	Top 0.253% Bottom 0.507%	Top 0% Bottom 0.253%	DL	2.45DL	1.84DL	DL	3.4DL	2.55DL



(a) Slab 1



(b) Slab 2

Fig. 2 Comparisons with test results

### 3.2 비선형해석 결과 비교

슬래브 콘크리트의 균열효과를 고려한 처짐산정법의 유효성을 검증하기 위하여, Park and Klingner<sup>12)</sup>에 의해 개발된 비선형해석 프로그램의 결과와 비교를 수행한다. 콘크리트의 재료모델로서 소성이론과 파괴모델의 통합방법을 사용하는 이 비선형해석법은 압축파괴와 인장균열에 대한 다중파괴기준을 사용한다. 유한요소해석을 위한 요소모델로서 면내거동과 휨거동을 나타낼 수 있는 9 절점의 쉘 요소를 사용하여 슬래브의 처짐을 나타낼 수 있으며, 슬래브의 거동에 대한 이 비선형해석 프로그램의 유효성은 슬래브 실험결과들과의 비교를 통해 검증되었다.<sup>13)</sup>

스팬 길이 6.0 m, 두께 170 mm의 정방형 플랫 플레이트에 대하여, 기존의 비선형 프로그램과 제안된 처짐산정법에 의한 결과들을 비교한다. 비선형 프로그램에 의한 유한요소해석을 위해, 하중 및 지지조건의 대칭성을 이용하여 Fig. 3과 같은 1/4 축소모델이 사용되었으며, 단면 및 재료 성질은 Table 3에 요약되어 있다. 시공단계에 따른 재료특성의 변화 효과는 적용되지 않았으며, 슬래브 콘크리트의 균열에 따른 제안된 처짐산정법의 유효성에 대한 검증이 주로 이루어졌다.

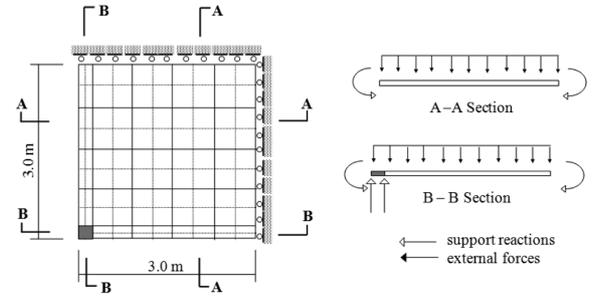


Fig. 3 Finite element model for nonlinear analysis

Fig. 4는 슬래브에 작용하는 바닥하중과 슬래브 중심의 처짐값의 관계에 대하여, 두 해석 방법에 의한 결과들을 비교하고 있다. 제안된 처짐산정법에 의해 얻어진 하중과 변형의 관계가 기존의 비선형해석법에 의한 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 제안된 산정법은 유효 단면 강성을 적용한 처짐산정법으로서, 콘크리트의 파괴에 의한 중극 하중(ultimate load)을 나타낼 수 없다. 그러나 약  $5.0DL (= 20.4 \text{ kN/m}^2)$  정도의 바닥하중이 작용할 때까지 하중과 슬래브 처짐의 관계를 정확히 예측하고 있으므로, 시공 하중 혹은 사용 하중에 대한 슬래브의 처짐값 추정에 적용 가능한 산정법이라 할 수 있다.

## 4. 처짐 산정법의 적용

### 4.1 시공하중 산정

ACI-347<sup>14)</sup>은 Grundy and Kabaila<sup>15)</sup>가 제안한 “간편법 (simplified method)”을 통하여 슬래브의 시공 하중을 결정하는 가이드라인을 제시하고 있다. 간편법에서 시공하중의 변화값은 각 층 슬래브의 재령에 따른 탄성계수의

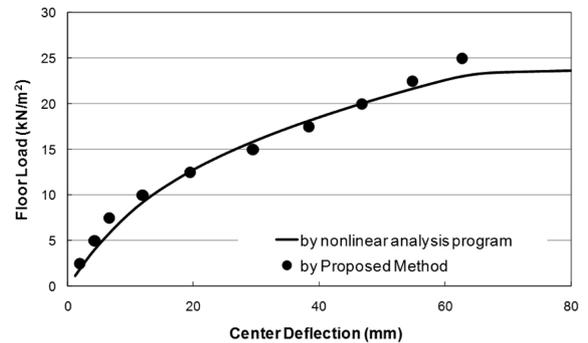


Fig. 4 Comparison with FEA result

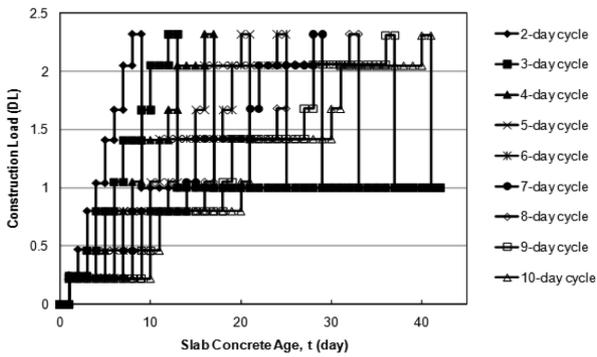
Table 3 Material properties and reinforcement for comparison with existing nonlinear analysis

Concrete		Reinforcement		
Comp. strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Reinforcement ratio	
$f_{ck}$	$E_c$		Column strip	Middle strip
24	23,000	400	Top 1.04/0.14% Bottom 0.42%	Top 0.32/0.14% Bottom 0.28%

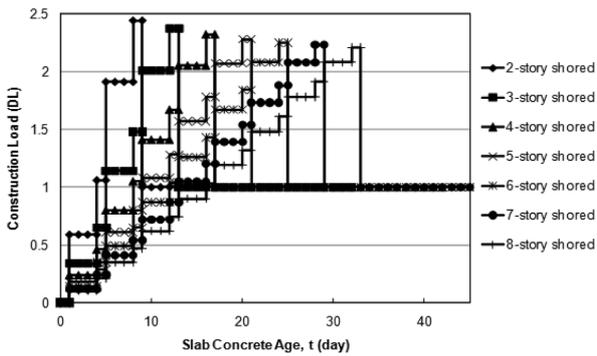
비에 따라 분배되어 누적된다. 동바리의 무한강성을 가정하고, 슬래브 콘크리트의 균열에 의한 효과를 고려하지 않아 정밀성이 비교적 낮을 수 있으나, 간단한 수계산만으로 시공하중을 산정할 수 있어 가장 많이 사용되고 있는 시공하중 산정법이다.

Fig. 5는 시공 활하중 0.5DL 및 최상층 콘크리트 타설 후 1일에 최하부 동바리가 제거되는 시공순서를 가정하여, 슬래브 층당 시공주기 및 동바리 지지 층 수 변화에 따라 간편법에 의하여 산정된 슬래브 시공하중의 변화를 보여주고 있다.<sup>3)</sup> 동바리에 의해 연결된 슬래브 시스템의 하부층으로 갈수록 보다 큰 시공 하중이 작용하며, 상부

층들과 연결된 동바리가 제거되기 직전에 최대 하중이 작용한다. 최대 시공 하중의 크기 및 작용 시점의 슬래브 콘크리트 재령은 시공 주기 및 동바리 지지층 수에 따라 달라진다. Fig. 5 (a)는 4개층 동바리 지지인 경우에 대하여, 2일~10일 시공주기에 따른 콘크리트 재령별 시공 하중을 보여 주고 있다. 시공 주기의 변화에 대하여 최대 시공 하중값은 거의 유사하나, 시공 주기가 길어질수록 최대 시공 하중이 작용하는 슬래브 콘크리트 재령이 커진다. Fig. 5 (b)는 4일 시공주기에 대하여, 2개층~8개층의 동바리 지지 층 수에 따른 콘크리트 재령별 시공 하중을 보여 주고 있다. 동바리 지지 층 수가 많아질수록 최대 시공 하중은 감소하며, 최대 시공 하중에 대응되는 슬래브 콘크리트 재령이 커진다.



(a) 4-story shored condition



(b) 4-day cycle condition

Fig. 5 Slab construction loads with concrete age

#### 4.2 처짐산정법 적용 결과

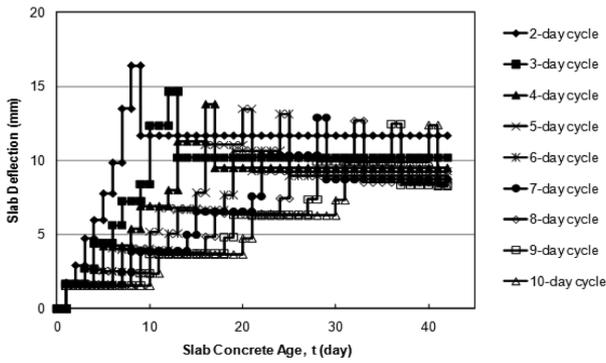
“4.1 시공하중 산정”에서 계산된 시공하중에 대하여, 이 논문에서 제안한 시공단계별 플랫폼 플레이트 처짐산정법을 적용한다. 적용 대상은 Table 3과 동일한 플랫폼 플레이트이며, 슬래브 시공주기 및 동바리 지지 층 수의 변화에 따른 처짐 결과를 분석한다. Table 4는 4일 주기 및 4개 층 동바리 지지의 경우에 대하여, 처짐을 산정하는 과정을 보여주고 있다. 시공단계별 시공하중 및 탄성계수값이 결정되고, 각 단계에서 주열대와 중간대에 대한 모멘트, 유효단면2차모멘트, 탄성처짐 등이 산정되어 비탄성처짐으로 증폭된 후 교차보법에 의하여 슬래브 중앙부의 처짐값이 결정된다.

슬래브 콘크리트 재령에 따른 처짐값의 변화는 Fig. 6에 요약되어 있다. 4개 층 동바리로 지지된 경우, 시공 주기가 변하더라도 시공하중값은 거의 유사하나(Fig. 5(a)), 시공주기가 짧아질수록 초기 재령의 슬래브에 하중이 작용하여 처짐이 크게 증가하였다(Fig. 6(a)). 5~6일 이상의 시공주기에 대하여 처짐값이 거의 유사하였으나, 2~4일의 시공주기에서는 시공주기에 따라 처짐이 크게 변화하였다. 이는 층당 시공주기가 짧기 때문에, 콘크리트 강

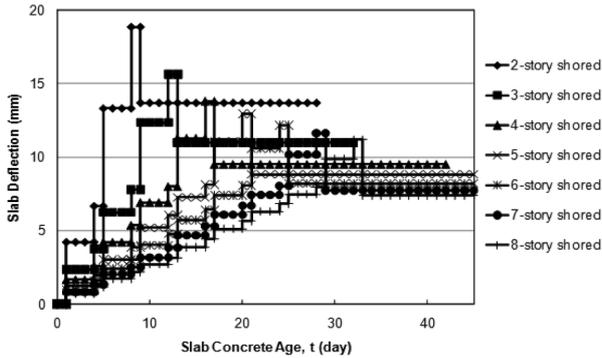
Table 4 Example of flat plate deflection calculations for 4-day cycle and 4-story shored condition

Step	Age (day)	$LF_i$	$\frac{E_{c,i}}{E_c}$	Column strip									Middle strip							$\delta_i$
				$M_{cl,i}$	$M_{cm,i}$	$\frac{I_{ce1,i}}{I_g}$	$\frac{I_{erm,i}}{I_g}$	$\frac{I_{ce,i}}{I_g}$	$\Delta\delta_{ce,i}$	$\delta_{ce,i}$	$\delta_{c,i}$	$M_{m1,i}$	$M_{mm,i}$	$\frac{I_{me1,i}}{I_g}$	$\frac{I_{mem,i}}{I_g}$	$\frac{I_{me,i}}{I_g}$	$\Delta\delta_{me,i}$	$\delta_{me,i}$	$\delta_{m,i}$	
1	1	0.24	0.45	-4.3	1.9	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	0.85	-1.4	1.2	1.00	1.00	1.00	0.82	0.82	0.82	1.67
2	4	0.46	0.74	-8.3	3.5	1.00	1.00	1.00	0.48	1.33	1.33	-2.7	2.4	1.00	1.00	1.00	0.46	1.28	1.28	2.61
3	5	0.80	0.78	-14.4	6.2	0.80	1.00	0.90	0.70	2.03	2.26	-4.7	4.1	1.00	1.00	1.00	0.68	1.96	1.96	4.22
4	8	1.05	0.86	-18.9	8.1	0.68	1.00	0.84	0.47	2.50	2.96	-6.2	5.4	1.00	1.00	1.00	0.45	2.41	2.41	5.37
5	12	1.41	0.92	-25.4	10.9	0.60	1.00	0.80	0.63	3.12	3.91	-8.3	7.2	1.00	1.00	1.00	0.61	3.01	3.01	6.92
6	13	1.67	0.93	-30.0	12.9	0.57	1.00	0.78	0.45	3.57	4.55	-9.8	8.6	1.00	1.00	1.00	0.43	3.45	3.45	8.00
7	16	2.05	0.95	-36.9	15.8	0.54	0.63	0.58	0.64	4.21	7.22	-12.0	10.5	1.00	1.00	1.00	0.62	4.06	4.06	11.29
8	17	2.32	0.96	-41.7	17.9	0.53	0.47	0.50	0.45	4.66	9.32	-13.6	11.9	1.00	1.00	1.00	0.44	4.50	4.50	13.81
9	18	1.00	0.97	-18.0	7.7	0.53	0.47	0.50	-2.19	-	7.12	-5.9	5.1	1.00	1.00	1.00	-2.12	-	2.38	9.51

(unit : “kN.m/m” for moments and “mm” for deflections)



(a) 4-story shored condition



(b) 4-day cycle condition

Fig. 6 Slab deflections with concrete age

도 및 강성이 충분히 발휘하기 이전에 과도한 시공하중이 작용하였기 때문이다. 상부 동바리 제거에 의하여 시공 과하중이 제하된 후의 잔류 처짐(residual deflection)도 시공주기가 길어질수록 감소됨을 알 수 있다.

시공주기가 4일로 동일할 때, 동바리 지지 층 수가 증가할수록 최대 시공하중의 크기가 감소하며(Fig. 5b), 처짐 산정 결과에서도 동바리 지지 층 수 증가에 따라 최대 처짐 및 잔류 처짐이 크게 감소하였다(Fig. 6b). 잔류 처짐은 시공 완료 후에도 지속적으로 존재하며, 크리프 효과 등에 의하여 장기적으로 증가하게 되므로 시공하중에 의한 처짐 영향을 직접적으로 나타낼 수 있는 지표가 된다.

Tables 5와 6은 시공주기 및 동바리 지지 층 수 변화에 따른 최대 슬래브 처짐값과 잔류 처짐값을 각각 요약하여 제시하고 있다. 시공단계를 고려하지 않을 경우, 28일 재령의 슬래브에 1개 층 자중이 작용할 때의 처짐값은 약 3.5 mm이다. 그러나, 시공하중 효과를 고려할 때 시공 중 최대 처짐값은 10.3~23.9 mm로 증가하여, 시공하중 효과를 고려하지 않을 때에 비해 약 2.9~6.5배의 처짐이 산정된다. 시공완료 후의 처짐(잔류 처짐)도 6.6~18.1 mm로서, 시공하중 효과를 고려하지 않을 때의 최대 5배 이상으로 증가한다. 구조설계기준<sup>8,9)</sup>에서 제시하는 휨부재의 장기처짐 증가가 약 2배라는 점을 고려할 때, 시공하중 효과를 고려하지 않을 경우 슬래브 자중만으로도 장기적으로 9.3~43.8 mm의 처짐 오차가 발생할 것으로 예측된다. 특히, 시공 중 균열발생에 의한 슬래브 유효

Table 5 Maximum slab deflection (unit: mm)

		Construction cycle (day)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Number of shored floors	2	23.9	20.7	18.9	18.1	17.5	17.1	16.7	16.3	16.1
	3	18.4	16.8	15.6	14.9	14.5	14.2	14.0	13.8	13.7
	4	16.4	14.7	13.8	13.5	13.1	12.9	12.7	12.5	12.4
	5	14.9	13.6	13.0	12.5	12.2	11.9	11.8	11.7	11.5
	6	13.9	12.9	12.2	11.8	11.6	11.3	11.3	11.1	11.0
	7	13.3	12.3	11.6	11.3	11.1	10.9	10.8	10.6	10.6
	8	12.8	11.8	11.2	10.9	10.7	10.5	10.5	10.3	10.3

Table 6 Residual slab deflection (unit: mm)

		Construction cycle (day)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Number of shored floors	2	18.1	15.3	13.7	13.1	12.6	12.3	11.9	11.6	11.4
	3	13.3	12.0	11.0	10.4	10.1	9.9	9.7	9.5	9.3
	4	11.7	10.2	9.5	9.2	9.0	8.7	8.5	8.3	8.3
	5	10.4	9.4	8.8	8.4	8.2	7.9	7.8	7.7	7.6
	6	9.7	8.8	8.2	7.9	7.7	7.4	7.3	7.2	7.2
	7	9.1	8.3	7.7	7.5	7.2	7.1	7.0	6.9	6.8
	8	8.8	7.9	7.4	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6	6.6

단면강성의 저하는 시공 후에도 지속적으로 남아 있으므로, 마감하중 및 활하중이 작용할 경우 처짐의 차이는 더욱 커질 것이다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 플랫 플레이트의 시공하중 및 균열효과를 고려한 시공단계처짐해석법을 제안하였다. 시공하중 변화에 따른 시공단계를 정의하고, 각 시공단계별로 슬래브 모멘트, 탄성 처짐, 유효단면2차모멘트를 계산하여, 탄성 처짐을 유효단면강성값에 의해 비탄성 처짐으로 증폭한다. 시공단계별로 산정된 탄성처짐값에 적절한 계수를 적용하여 전체 처짐을 산정하는 과정으로서, 유효요소해석 또는 비탄성해석, 반복 계산 등의 복잡한 작업 없이 단순 계산 과정을 통하여 플랫 플레이트의 시공 중 처짐값 및 시공 후의 잔류 처짐값을 산정할 수 있다.

제안된 방법은 기존 실험 및 비선형 해석 결과와의 비교를 통하여 검증되었으며, 제안법의 적용을 통하여, 시공 중인 플랫 플레이트의 처짐에 대한 시공주기 및 동바리 지지 층 수의 영향이 분석되었다. 시공하중 효과를 고려하지 않을 경우, 플랫 플레이트의 시공 중 최대 처짐 및 잔류 처짐을 크게 저평가하는 것으로 분석되었으며, 시공 완료 후의 마감하중 및 활하중에 의한 처짐 영향과 함께 장기적인 처짐 거동에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

## 감사의 글

이 연구는 광운대학교 2008년도 교내학술연구비 및 삼 시공하중 및 균열 효과를 고려한 플랫 플레이트의 처짐 산정 | 803

성물산 주택ENG팀의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Gardner, N. J. and Fu, H. C., "Effects of High Construction Loads on the Long-Term Deflections of Flat Slabs," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 3, 1987, pp. 349~360.
2. Vollum, R. L., Moss, R. M., and Hossain, T. R., "Slab Deflection in the Cardington In-Situ Concrete Frame Building," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 1, 2002, pp. 23~34.
3. 김재요, "플랫 플레이트 시스템의 처짐에 대한 시공 중 과하중의 영향 평가를 위한 실용해석 기법의 적용," 한국전산구조공학회 논문집, 22권, 1호, 2009, pp. 25~34.
4. Rangan, B. V., "Estimation of Slab Deflections in Flat Plate Buildings," *ACI Journal*, Vol. 83, No. 2, 1986, pp. 269~273.
5. 강성훈, 최경규, 박홍근, "시공 하중의 영향을 받는 플랫 플레이트의 최소 두께," 콘크리트학회 논문집, 15권, 5호, 2003, pp. 650~661.
6. Scanlon, A. and Murray, D. W., "Practical Calculation of Two-Way Slab Deflections," *Concrete International*, 1982, pp. 43~50.
7. ACI Committee 435, "Control of Deflection in Concrete Structures (ACI 435R-95)," American Concrete Institute, 2003, 77 pp.
8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)," American Concrete Institute, 2008, 473 pp.
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, 523 pp.
10. Bischoff, P. H. and Scanlon, A., "Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 8, 2007, pp. 68~75.
11. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209R-92)," American Concrete Institute, 1997, 77 pp.
12. Park, H. and Klingner, R. E., "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 5, 1997, pp. 643~651.
13. Park, H. and Kim, E. H., "RC Flat Plate under Combined In-Plane and Out-of-Plane Loads," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 10, 1999, pp. 1136~1142.
14. ACI 347.2R-05, "Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multistory Buildings," *ACI Committee 347*, American Concrete Institute, 2005, 18 pp.
15. Grundy, P. and Kabaila, A., "Construction Loads on Slab with Shored Formwork in Multistory Buildings," *ACI Journal*, Vol. 60, No. 12, 1963, pp. 1729~1738.

**요 약** 테두리 보에 의한 휨강성이 확보되지 않은 철근콘크리트 플랫 플레이트의 구조설계는 강도 조건 뿐만 아니라 사용성에 의하여 지배받을 수 있다. 특히, 조기 재령 슬래브의 과하중 작용 및 균열 발생은 시공 중인 플랫 플레이트의 처짐을 크게 증가시키므로, 시공 순서 및 슬래브 처짐에 대한 영향은 플랫 플레이트 시스템 설계의 주요한 요소가 될 수 있다. 이 연구에서는 시공 순서 및 콘크리트 균열 효과를 고려한 슬래브 처짐 산정 과정을 제안한다. 시공단계 및 시공하중이 간편법에 의하여 정의되고, 각 시공단계별로 슬래브 모멘트 및 탄성 처짐, 유효단면2차모멘트가 계산된다. 주열대와 중간대에서의 탄성 처짐은 유효단면2차모멘트 효과에 의해 비탄성 처짐으로 증폭되며, 슬래브 중앙부 처짐은 교차보법에 의하여 산정된다. 제안된 방법은 기존 실험 결과 및 비선형 해석 결과와의 비교를 통하여 검증된다. 또한, 제안법의 적용을 통하여, 시공 중인 플랫 플레이트의 처짐에 대한 시공주기 및 동바리 지지 층 수의 영향이 분석된다.

**핵심용어** : 플랫 플레이트, 처짐, 시공하중, 균열