

# Flat Slab의 장기처짐 산정 Long-Term Deflection of Flat Slab



정광량 대표이사  
(주)동양구조 안전기술

## 1. 서론

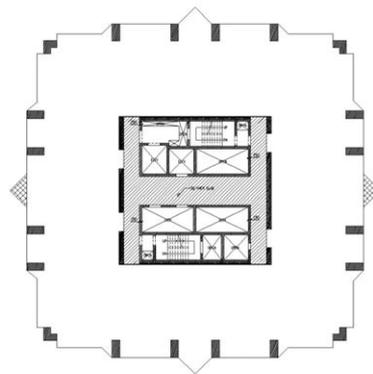
플랫 슬래브는 RC 공사비의 절반을 점유하고 있는 거푸집 관련 인건비 및 재료비의 상승이 불가피한 단점을 해결하기 위한 대안으로 국내에서도 최근들어 초고층 주상복합 건물에 자주 사용되고 있는 시스템이다. 플랫 슬래브는 보 없이 슬래브를 직접 기둥에 지지시키는 구조로서 삼풍백화점 붕괴 이후 안정성 등의 문제를 이유로 추가적인 기술 개발이나 현장 적용이 이루어지지 않고 거의 사장된 시스템으로 간주되어 왔으나 최근 <그림 1.1>의 부산 Centum Fiesta과 같은 초고층 주상복합 건물의 보편화와 더불어 다수의 초고층 건축물에 적용되고 있으며, 빈도 역시 증가 추세에 있다. 그러나, 이러한 최근 추세에 맞춰 간과되어 온 중요한 사실은 최근의 플랫 슬래브 적용이 북미 등 선진국의 경우와는 달리 장기간의 연구나 경험 또는 기술 등이 지속적으로 추진되고 축적 되지 않은 상태에서 다소간 무분별하게 적용되고 있다는 것이다.



☞ <그림 1.1>  
부산 Centum Fiesta(60층)

플랫 슬래브 시스템은 초기 처짐 과다 발생, 복잡한 접합부 상세, 거푸집 및 동바리 존치기간의 장기화 등의 단점에 대한 기본적인 연구 및 기술을 바탕으로 현장경험을 쌓아가는 것이 무엇보다 필요한 실정이다. 또한, 부족한 현재의 국내 상황에서도 특히 주의가 되는 것은 사용성 문제와 직결되는 플랫 슬래브의 처짐 및 장기처짐이라 할 수 있다. 2방향 슬래브와 같은 경우 초기 콘크리트의 낮은 탄성계수로 인한 과도한 초기처짐의 영향을 크게 받고 있으며 이는 더 큰 장기처짐을 야기시키고 더불어 여러 가지의 사용성 문제를 발생시킨다.

현재까지 국내기준에서는 2방향 슬래브의 처짐과 장기 처짐에 대한 다른 규정이 따로 지정되어 있지 않은채 일방향 슬래브(보)와 같은 규정을 따르도록 지침하고 있다. 그러나, ACI의 경우 2방향 슬래브에 대하여 일방향 슬래브와 같은 규정을 따르는 것은 과소평가를 할 우려가 있으며, 장기처짐 계산식 또한 보의 장기처짐 식과는 다른식을 사용하고 있는 것을 볼 때 플랫 슬래브의 설계에 많은 주의를 필요로 한다.



<그림 1.2> Centum Fiesta 평면

균열효과를 만족스럽게 평가하여 장기처짐을 구할 수 있는 프로그램에 대한 인식도 많지 않다. <그림 1.2>는 부산 Centum Fiesta의 기본 평면으로서 국내 초고층 주상복합 시설의 플랫 슬래브에 가장 많이 사용되고 있는 전단벽-골조 시스템의 예라 할 수 있다.

그림과 같이 기둥으로 지지되는 전형적인 슬래브가 아닌 외부에 기둥, 가운데에 전단벽이 있는 경우는 ACI 처짐 산정방법으로는 전단벽의 영향 고려에 어려움이 있기 때문에 유한요소 프로그램을 사용하여 해석을 한다. 국내 바닥판 전용 프로그램으로 마이다스의 SDSw와 국외 프로그램으로 CSI의 SAFE등을 들 수 있다. 즉시 처짐의 경우 SDSw와 SAFE 모두 신뢰할 수 있는 해석이 가능하나, 플랫 슬래브의 장기처짐을 구할 수 있는 비탄성 해석은 현재 SAFE로 해석이 가능하다. 따라서, 본 기고에서는 플랫 슬래브의 장기처짐에 대한 정확한 이해를 돕고, SAFE 유한요소 프로그램을 이용한 비탄성 해석에 대해 소개하여 플랫 슬래브의 장기처짐에 대한 이해에 작은 도움이 되고자 한다.

## 2. 플랫 슬래브의 처짐

2방향 슬래브와 같은 경우 초기 콘크리트의 낮은 탄성계수로 인한 과도한 초기처짐의 영향을 크게 받고 있으며 이는 더 큰 장기처짐을 야기시키고 더불어 여러 가지의 사용성 문제를 발생시킨다. 또한 칸막이벽과 문, 창문과 같은 비구조 요소가 손상을 입는 대부분의 원인을 제공하게 된다. 다음 <표 2.1>은 장기처짐 원인 별 각 기여도와 발생원인을 정리한 것이다. <표 2.1>을 살펴보면 2방향 슬래브의 장기처짐은 시공 과정 중에 발생하는 처짐 유발 요소와 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있으며 시공 중 고려되어야 하는 사항으로는 첫째, 공정 진행에 따른 동바리 설치와 재설치 계획 및 시공하중의 영향이 있으며 둘째, 양생 기간의 주변 환경 세제, 건조수축(Shrinkage), 크리프(Creep)와 같은 콘크리트의 재료적 특성 등이 있다.

<표 2.1> 처짐 원인과 기여도

처짐 종류	비율	처짐 발생 원인
초기 탄성 처짐	13.0%	동바리 제거로 인한 고정하중 작용으로 발생
장기 탄성 처짐	1.5%	비균열 단면 상태에서 초과하중 및 마감재 하중 작용
초기 균열 처짐	0.5%	동바리 제거로 인한 균열단면 발생으로 처짐 발생
장기 균열 처짐	19.0%	시공하중에 따른 균열 발생 지속하중에 의한 인장 파괴 발생
건조 수축 처짐	26.0%	건조 수축에 의한 처짐
크리프 처짐	40.0%	크리프에 의한 처짐

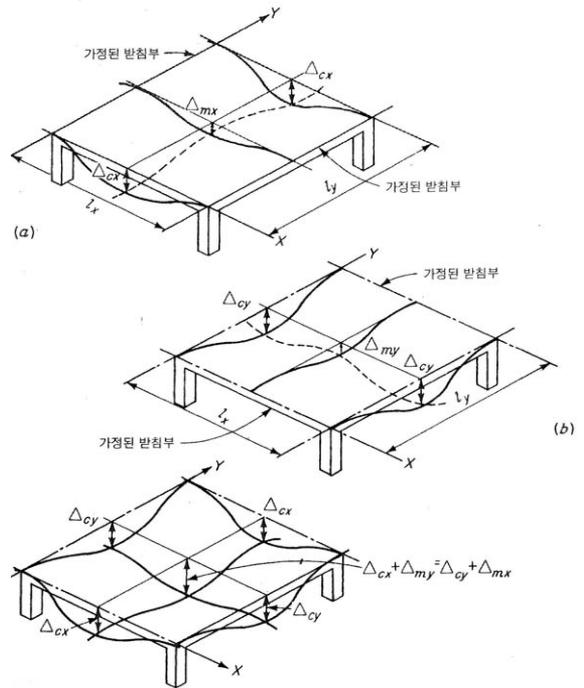
플랫 슬래브의 처짐계산은 2방향 슬래브의 처짐계산을 따른다. 철근 콘크리트 부재와 마찬가지로 2방향 슬래브의 처짐은 즉각적인 처짐과 장기적인 처짐으로 구분되며, 즉각적인 처짐은 하중이 작용하

자마자 발생하는 처짐으로서, 탄성처짐 또는 즉시처짐이라고 한다. 처짐은 사용하중하에서 탄성거동을 기초로 계산 할 수 있으며, 장기적인 처짐은 주로 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인하여 시간의 경과와 더불어 진행되는 처짐이라 할 수 있다. 처짐을 구하는 식은 보 유효강성 구하는 식을 그대로 사용하는 등 비슷한 점이 있으나, 장기처짐을 구하는 방법에서 조금 다르다.

## 2.1 즉시처짐과 장기처짐

### 2.1.1 즉시처짐

플랫 슬래브는 보-슬래브 시스템에 비하여 처짐에 대하여 더 세심한 주의와 검토가 필요하다. 등분포 하중을 받는 플랫 슬래브와 같은 2방향 슬래브의 처짐은 모멘트 해석법인 등가 골조법으로 계산될 수 있다. 이 때 주열대와 중간대, 종방향과 횡방향 모멘트 계수, 그리고 많은 다른 사항들에 대한 정의는 모멘트 해석법과 같다. 기둥의 중심선에 의해 싸여지는 유닛 슬래브 영역은 <그림 2.2>와 같다.



<그림 2.2> 플랫 슬래브의 처짐

처짐 계산은 그림에서 보듯 한방향의 처짐을 먼저 계산 한 후에 다른 방향에서의 처짐에 대한 영향을 구하여 전체 처짐을 계산한다. <그림 2.2 a>에서 슬래브는 경간  $l_x$ 이고, 폭이 패널길이  $l_y$ 와 같은 넓고 가는 보로 거동한다고 간주한다. 그리고, 처음에 슬래브는  $x=0$ 과  $x=l_x$ 에서 연직변위가 일어나지 않는 받침점에 의해 지지되어 있다고 간주한다.

슬래브 폭의 방향으로 휨강성뿐 아니라 모멘트의 변동 때문에 X방

향의 모든 단위 폭은 같게 처지지 않는다. 일반적으로 중간대 구역의 슬래브의 곡률은 주열대의 곡률보다 작는데, 그 이유는 중간대의 모멘트가 작기 때문이다. Y방향으로도 같은 식으로 계산을 하게 된다. 슬래브의 실제 처짐 모양은 <그림 2.2 c>에 나와 있다.

슬래브 중앙의 처짐은 한 방향의 주열대의 중앙처짐과 다른 방향의 중간대의 처짐과의 합이다. 즉,

$$\Delta_{max} = \Delta_{cx} + \Delta_{my} \quad \text{또는}$$

$$\Delta_{max} = \Delta_{cy} + \Delta_{mx}$$

임의 방향의 슬래브의 처짐 계산에서, 우선 모든 단면에서 휨모멘트가 일정하게 슬래브 폭에 걸쳐서 분포하고 슬래브의 횡방향으로의 휨은 없다고 가정하여 원통의 표면처럼 처진다고 가정한다. 이 때 받침점은 회전과 수직 변위에 대해서 완전히 고정되어 있다고 가정하여 상대처짐을 다음 식에 의해 계산한다.

$$\Delta_{max} = \Delta_{cy} + \Delta_{mx} \quad \text{또는}$$

$$\Delta_{f,ref} = \frac{wl^4}{384E_c I_{frame}}$$

w는 경간 l 을 따라 단위길이상 작용하는 등분포하중이고, I<sub>frame</sub>은 기둥선을 따라 있는 보나 지판과 기둥 머리의 영향을 포함하는 슬래브 판의 단면 2차 모멘트이다. 물론 보와 마찬가지로 균열을 고려한 유효강성을 사용한다. 철근콘크리트 보의 실제 처짐은 <그림 2.1>과 같이 I<sub>e</sub>에 의해 계산된 값보다 작다. 이는 실제의 단면 2차 모멘트 I가 각 부재에 걸리는 작용 모멘트와 하중에 따라 균열모멘트의 균열 단면 2차 모멘트가 변화하기 때문에 처짐 계산을 하기 위하여 유효 단면 2차 모멘트 I<sub>e</sub>를 사용한다.

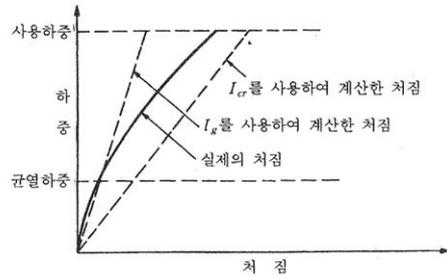
$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g$$

여기서, M<sub>cr</sub> = 균열 모멘트

M<sub>a</sub> = 처짐이 계산되는 단계에서 사용 하중에 의해 일어나는 최대 휨모멘트

I<sub>e</sub> = 철근을 무시한 콘크리트의 전체 단면 2차 모멘트

I<sub>cr</sub> = 균열 단면의 단면 2차 모멘트



<그림 2.1> 철근콘크리트 보의 처짐

유효강성을 이용하여 Strip 별로 모멘트를 분배하여 계산을 하게 되는데, 이것은 구조설계 기준의 규정에 따른 휨모멘트의 횡방향 분포는 정-부 모멘트 단면에서 같지 않다는 사실에서 약간의 어려움이 있다. 그러나 이것은 각 설계대의 정-부 모멘트 분배계수의 단순한 평균값을 사용함으로써 구조설계기준에서 규정하고 있는 다른 처짐 방법들에 의한 것과 같은 정확성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 일상적으로 필요한 정확성도 만족시키는 것으로 나타났다.

### 2.1.2 장기처짐

ACI 318에서는 보 식과 같이 철근비(ρ')와 지속하중 재하기간 별 시간종속적 계수(λ)로 이루어진 장기처짐 산정용 계수(λ)를 사용하여 이 방향 슬래브의 장기처짐을 계산한다. 기준에서는 실험에 근거한 다음의 계수를 지속하중에 의한 탄성처짐(Δ<sub>i</sub>)에 곱하여 장기처짐(Δ<sub>a</sub>)를 구하도록 규정하고 있다.

$$\Delta_a = \lambda \Delta_i$$

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \rho'} \quad \text{여기서 } \xi = 2.0 \quad \text{5년 이상,}$$

$$\xi = 1.4 \quad \text{12개월 이상}$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{bd} \quad \xi = 1.2 \quad \text{6개월 이상}$$

또한 2방향 슬래브에 대해서는 일방향 식을 그대로 사용하기위해 보다 더 큰 값이 필요하다고 제안하고 있다. 즉, 5년 이상 지속하중에 대한 계수로 일방향의 2.0보다 큰 값인 2.5를 제안하고 있다. Nilson의 경우도 실제 구조물을 통한 실험값과 경험에 의하면 일방향 슬래브와 같이 장기처짐을 구하는 것은 매우 과소평가하고 있는 것으로 나타나기 때문에 장기처짐 계산에서 2.5에서 4.0의 값을 사용하도록 추천하고 있으며, 3.0을 사용할 경우 대부분의 경우에 안전하다고 제안하였다.

### 2.2 플랫 슬래브의 장기처짐 계산과정

#### ① 바닥판 선정 (재료강도 설정)

- ② 계수 하중 산정 : 1.4DL + 1.7LL
- ③ 모멘트 계산 및 바닥판 설계 : 바닥판 두께, 철근량
- ④ 사용하중(1.0DL + 1.0LL)에 의한 작용 모멘트,  $M$ 를 Strip별로 계산

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_i}$$

$$f_r = \phi(2.0)\sqrt{f_{ck}}$$

⑤ Strip별  $I_e$ ,  $M_e$  산정

- ⑥ 균열 단면 2차 모멘트,  $I_e$ 를 계산
- ⑦ 유효단면 2차 모멘트  $I_e$ 를 계산

$$I_{cr} = \frac{bk^3d^3}{3} + nA_s(d - kd)^2$$

$$B = \frac{b}{nA_s}$$

$$kd = \frac{\sqrt{2dB + 1} - 1}{B}$$

- ⑧ 즉시처짐 계산

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

or

$$\Delta_{max} = \Delta_{cx} + \Delta_{my} \text{ or}$$

$$\Delta_{max} = \Delta_{cy} + \Delta_{mx}$$

- ⑨ 시간중속적 계수 ( $\xi$ )를 이용하여 장기처짐 계산

$$\lambda(\Delta_i)_{sus} = \frac{2.5}{1 + 50\rho} [(\Delta_i)_d + 0.4(\Delta_i)_l]$$

(LL의 40%를 지속하중으로 가정)

$$\text{장기처짐} = (\Delta_{cp+sh}) + (\Delta_i)_l$$

- ⑩ 기준과 체크

$$(\Delta_{cp+sh}) + (\Delta_i)_l \leq (l_n \text{ or } l) / 240$$

$$(\Delta_{cp+sh}) + (\Delta_i)_l \leq (l_n \text{ or } l) / 480$$

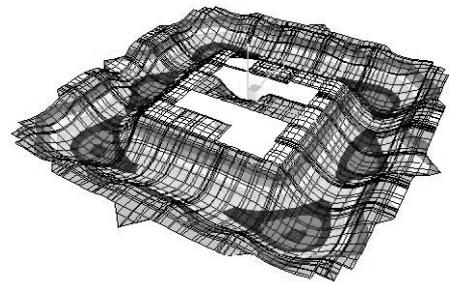
주의 깊게 봐야 할 것은 과정 ⑨의 식이 보의 장기처짐 계산 식과 다르다는 것이다.

### 3. 유한요소프로그램

#### 3.1 SAFE Program

일반적인 정적해석에서는 탄성 영역 내에서의 모멘트 분배만으로도 충분하다고 인식하고 있으나, 2방향 슬래브의 장기 처짐을 구하고자 할 경우, 실제 거동은 균열에 의한 비탄성 거동을 하게 되고, 이에 대한 정확한 거동을 구하기 위해서는 균열단면의 비탄성 해석을 수행하여야 한다. 또한 처짐을 제어하기 위하여 설계자들이 가장 많이 쓰는 방법인 압축철근을 배근하는 것에 대한 평가를 하기 위해서는 압축철근 또한 고려되어야 한다. 이에 본 기고에서는 SAFE 프로그램을 이용하여 장기처짐을 구하는 과정을 소개하고, 수계산과 비교하였다.

〈그림 3.1〉은 SAFE 프로그램을 통해 얻어진 처짐형상이다. SAFE 프로그램의 모델링은 주열대와 주간대로 영역을 나누며 모델링하여 Strip 별 모멘트와 전단력을 구할 수 있는 기능이 있으며, Design 기능 또한 포함되어 있다.



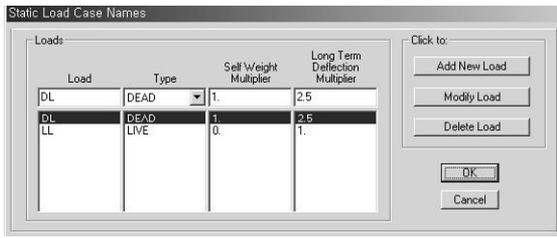
〈그림 3.1〉 플랫 슬래브의 처짐

#### 3.1.1 알고리즘

장기처짐을 구하기 위한 비탄성 해석은 Set Option기능에서 선택할 수 있으며, 알고리즘은 계산과정에서 소개한 것은 같은 루트를 따라 실행된다. 먼저 탄성해석을 통한 모멘트와 전단력을 구하여 Design 과정을 거친 후에 사용하중에 의한 비탄성 해석을 하게 된다. 이때에 철근 배근은 프로그램이 계산한 철근량이 사용되며, Version 7.0 부터는 설계자가 철근 배근을 할수 있는 기능이 있어 더 정확한 해석을 가능하도록 하였다.

#### 3.1.2 압축 철근의 고려

일반적인 RC 슬래브 해석에서는 철근에 대한 고려를 하지 않는다. 따라서 SAFE에서는 〈그림 3.2〉와같이 장기처짐 제어를 위해 압축 철근에 대한 효과를 장기처짐시간계수  $\lambda$ 에 포함하고 있다.



〈그림 3.2〉 장기처짐 시간계수 입력 기능

이에 SAFE 프로그램에서는  $\lambda$ 을 조정하여 압축철근의 고려가 가능하도록 하고 있다. 앞에서 설명하였듯이 철근을 설계자의 임의대로 배근할 수 있는 기능이 있으나, 이것은 Strip별로 배근하도록 설계 되기 때문에 압축철근의 효과만을 확인하기엔 어려움이 있다.

### 3.2 SAFE Program과 계산식의 비교

〈표 3.1〉은 위에서 소개한 ACI 수계산과 SAFE 프로그램의 값을 비교하였다.

〈표 3.1〉 SAFE 와 수계산 비교

Span (m)	Col. (cm)	THK · (mm)	장기 처짐		
			SAFE	수계산	(%)
6.0×6.0	50	25	9.23	12.23	33.6
8.0×8.0	70	25	18.69	22.22	18.7
9.0×9.0	80	20	30.00	31.91	6.4

ACI 계산식과 SAFE프로그램을 이용하여 사용하중으로(DL+LL)구해진 비탄성 처짐을 비교해 보면, 계산식이 프로그램보다 약 6~30%정도 큰 값을 보였으며, 대체적으로 비슷한 경향을 보이는 것을 볼 때 SAFE의 장기처짐 값이 정확히 해석된다고 사료된다. 계산식이 프로그램 값보다 늘 큰 이유는 유한요소는 각 요소당  $I_s$ 과  $M_s$ 과를 구하여  $I_s$ 를 구하는 반면 계산식에서는 각 Strip별로 가장 불리한  $I_s$ 과  $M_s$ 을 산정하기 때문에 상대적으로  $I_s$ 가 작게 되어 처짐이 더 크게 발생하게 된다

## 4. 결론

플랫 슬래브 시스템이 기존 바닥 시스템과 비교하여 많은 장점과 설계, 시공 및 경제성 등 건설 여러 분야에 다양한 효율성 및 우수성을 제공할 수 있는 시스템임은 재론의 여지가 없을 만큼 분명한 사실이다. 그리고, 점차 증가하고 있는 플랫 슬래브의 사용에 있어서 무엇보다도 처짐 및 장기처짐과 같은 사용성에 대한 정확하고 신중한 검토가 필요하며, 이를 위해서는 2방향 슬래브 처짐에 대한 정확한 이해와 콘크리트 부재의 비탄성 해석이 필요하다.

따라서, 플랫 슬래브의 처짐에 대한 이해와 수계산 과정에 대해 정리하고, SAFE 프로그램을 이용한 유한요소 해석에 대해 소개하였다. 이와 더불어 장기처짐의 정확한 이해뿐 아니라 지속적으로 작용하지 않는 시공하중이더라도 콘크리트의 강도가 완전히 발현되지 않은 초기 재령 상태에서 작용하는 경우와 같은 플랫 슬래브 시공에 있어서 정확한 시공하중의 산정과 동바리, 선동바리 및 재동바리 등의 설치에 대한 상세한 시공계획이 반드시 수반되어야 한다는 사실 또한 잊지 말아야 할 것이다.

### 5.Reference

1. ACI 318-95 Building Code and Commentary
2. Design of Concrete Structure, A.H.Nilson
3. SAFE, User's Manual, CSI
4. 콘크리트 구조설계기본, 대한건축학회
5. Reinforced Concrete Slabs, R.Park
6. ACI 435.8R-85, "Observe Deflections of Reinforced Concrete Slab Systems, and Cause of Large Deflections", ACI Committee 435, pp.15-61
7. N.J. Garder, "Long-Term Deflections of Two-way Slabs", ACI Complication