

PSC 연속 평판슬래브의 지점 부모멘트 산정법 연구

A Study on the New Computational Methods for the Negative Moment at Column Support in PSC Flat Plate

박 선 규*
Park, Sun-Kyu

이 범 식**
Lee, Bum-Sik

한 만 엽***
Han, Man-Yop

요 지

PSC 연속 평판슬래브의 설계는 부정적 평판슬래브에 대한 정확한 해석의 어려움 등으로 증가보이론과 증가골조 이론에 의한 근사식을 수정없이 사용하거나 컴퓨터를 이용한 해석에 의존하고 있으나 해석결과를 간단하고 정확히 평가할 수 있는 기법은 없는 실정이다. 또한 PSC 연속 평판슬래브의 부재력은 긴장재의 곡선형태에 따라 변화하므로 실제 설계시 PS긴장재의 정확한 곡선식을 찾는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 비부착 PSC 연속 평판슬래브를 설계할 때 기둥과 기둥을 연결하는 PS긴장재의 기하학적 곡선형태를 결정하는 방법과, PS긴장력으로 인해 발생하는 평판슬래브의 기둥부 부모멘트에 대하여 관이론을 기초로 간편하게 계산하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 이론으로 계산된 PSC 연속 평판슬래브에 대한 해석값과 유한요소 해석에 의한 지점 부모멘트를 비교 검토하여, 본 논문에서 제시한 기법의 타당성을 입증하였다. 따라서 본 연구는 설계자에게 컴퓨터의 해석결과를 간단하고 정확하게 검증할 수 있도록 하였다.

핵심용어 : PSC 평판슬래브, PS긴장재 곡선, 증가하중, 지점 부모멘트

Abstract

An accurate analysis and design of Prestressed Concrete Flat Plate(PSC Flat Plate) is complicated. Therefore, more simple and convenient methods-Equivalent Beam Methods, Equivalent Frame Methods and FEM Methods-have been used to design a PSC Flat Plate. But it is difficult to evaluate the calculated results of above mentioned methods. Member forces of PSC Flat Plate are varying degrees of prestressed tendon profiles. So, it is important to find the special qualities of parabolic tendon profiles.

In this study, a new method to determine the geometrical profile equation of tendon on top of column is proposed to design an unbonded continuous PSC flat slab. And a new and simple method to calculate the negative moment due to prestressing force on top of column is also proposed, which is based on classical plate theory. By comparing the negative moment calculated by a new method proposed in this paper and the moment calculated by FEM analysis on top of column in PSC continuous flat slab, the proposed method is proved to be convenient and accurate. Therefore, Using the proposed methods, Structural Engineers will more simply and accurately inspect the computer analysis results of PSC Flat Plate.

Keywords : PSC flat slab, equation of tendon, equivalent load, negative moment

* 정회원·성균관대학교 토목공학과, 조교수
** 정회원·대한주택공사 주택연구소, 연구원
*** 정회원·아주대학교 토목공학과, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

프리스트레스가 도입된 평판슬래브를 건축물에 사용할 경우 재래식공법과 비교하여 기둥간격이 매우 넓어지고 보가 없어 층고를 낮출 수 있으므로 내부공간의 활용성을 높일 수 있으며, 연직하중에 대한 PS긴장재의 상쇄효과로 구조물의 자중을 감소시킬 수 있어서 매우 경제적이다. 그러나 PSC 평판슬래브를 설계할 때 복잡한 부정정 평판슬래브에 대한 정확한 해석의 어려움으로 등가보 이론⁹⁾과 등가골조 이론¹⁰⁾에 의한 근사식을 사용하거나 유한요소법에 의존하고 있어 해석 결과를 간단하고도 정확히 평가할 수 있는 기법은 없는 실정이다. PSC 연속 평판슬래브를 해석할 때는 PS긴장재의 곡선배치로 발생한 긴장력의 과상 마찰손실을 고려하여야 한다. 따라서 PS긴장재의 마찰 손실력이 제외된 유효 긴장력을 각각의 위치마다 정확히 알기 위해서는 PS강연선의 곡선형태의 특성 값을 찾는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 유효 두께가 얇은 PSC 연속 평판슬래브에서는 PS긴장재 곡선의 특성값을 구하기 위하여 복부(web)의 유효높이가 큰 PSC 교량에서와 같은 포물선의 2차 함수식을 사용하고 있다¹⁾. 이 경우 PS긴장재는 그림 1에서 볼 수 있듯이 지간의 중앙부에는 적용이 가능하지만 지점부의 뾰족한 부분, 즉 PS긴장재가 정모멘트에서 부모멘트로 바뀌는 변곡점에서 지점까지는 본 식을 그대로 적용할 수 없기 때문에 경험식에 따라 적절히 배치하고 있다. 하지만 PSC 연속보는 내적 부정정이므로 부재력과 PS긴장력의 손실량을 계산하기 위해서는 정확한 PS긴장재의 전체 배근 상태를 알아야 한다.

따라서 본 연구에서는 부착되지 않은 연속 PSC평판 슬래브에 PS긴장재의 곡선형태를 2차 함수의 포물선식 대신에 원의 기하학적인 특징을 고려한 곡선의 특성값을 계산하였다. 또한 제안된 곡선식의 특성값에 따라 배치된 PS긴장재의 프리스트레싱에 의한 상향력과 연직하중이 작용할 때 평판슬래브의 판이론을 기초로 한 지점부위의 휨모멘트 계산방법을 제안하였다.

제안된 설계기법으로 PSC 연속 평판슬래브에 대한 해석을 수행하여, 기존의 등가보 이론과 컴퓨터

해석에 의한 지점 부모멘트 값과 비교·검토하여, 본 논문에서 제시한 기법의 타당성을 입증하였다.

2. PS긴장재 곡선의 특성값

일반적으로 PSC 연속 평판슬래브의 지간부 PS긴장재 배치는 그림 1과 같으며, 긴장재 곡선의 특성값을 찾기 위하여 곡선식은 식 (1)과 같이 2차함수로 구성된 포물선 식을 사용하고 있다.

$$Z = 4fx(1-x) + ex \tag{1}$$

여기서,

f_1, f_2 : 양 지간의 PS긴장재 포물선의 새그(sag)
 e : B지점에서 PS긴장재의 편심거리

식 (1)의 긴장재 곡선을 PSC 연속 평판슬래브에 사용할 경우 지점부에는 또 다른 함수식을 사용하거나, 아니면 임의로 뾰족한 부분을 둥글게 처리하여야 하므로 PS긴장재는 지간에서 지점까지 하나의 연속성이 없으므로 연속 평판슬래브에 직접 적용할 수가 없다. 따라서 본 절에서는 지간과 지점을 연결하는 PS긴장재의 연속적인 곡선을 원의 기하학적인 상관관계를 이용하여 간편하고 정확하게 곡선의 특성값을 산정하는 방법을 제안한다.

그림 2에서와 같이 PSC 연속 평판슬래브의 내부공간에 PS긴장재의 곡선AC와 곡선CB를 닮은 꼴의 원주형태로 가정할 수 있다.

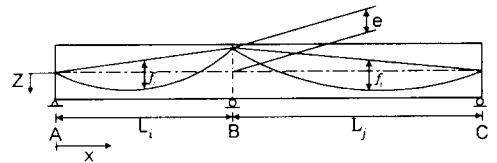


그림 1 PS긴장재의 일반적인 배치형태

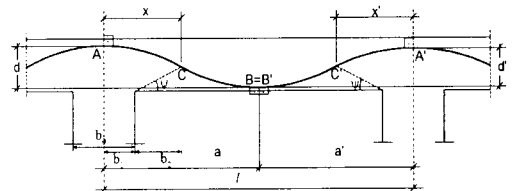


그림 2 평판슬래브 내부경간의 PS긴장재 배치에

그림 2에서 나타낸 PS긴장재의 배치를 원주형 PS긴장재의 기하학적 형상으로 나타내면 그림 3과 같다. 일반적으로 평판슬래브의 설계시 지간 길이(l)와 슬래브 유효높이(d)가 주어지면 원주 형태의 기하학적인 특성을 고려한 PS긴장재의 지점에서 PS긴장재 변곡점까지의 거리 (x), PS긴장재의 지점부와 지간중앙의 편심거리 (f_1, f_2), PS긴장재의 곡선AC와 곡선BC의 곡률 반경 (R_{AC}, R_{BC}), 변곡점에서의 PS긴장재 각변화 ($\theta_1 = \theta_2$) 및 PS긴장재의 곡선AC와 BC의 길이 (l_{AC}, l_{BC})를 계산할 수 있다.

그림 3에서 지간중앙에서의 PS긴장재의 편심거리 (f_2)를 x 의 1차함수로 나타내면 다음과 같다.

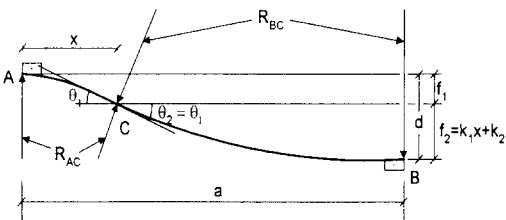
$$f_2 = k_1x + k_2 \tag{2}$$

곡선AC와 BC는 얇은꼴 원주의 기하학적 상관 관계에 따라 지점중앙에서 PS긴장재의 변곡점까지의 거리(x)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = a \frac{d - k_2}{k_1 a + d} \tag{3}$$

지점중앙에서 PS긴장재 변곡점까지의 거리(x)는 그림 2에서 볼 수 있듯이 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = b_1 + b_2 = b_1 + (f_2 + c) \cot \psi \tag{4}$$



점C : 곡선AB의 변곡점
 점A : 지점부의 PS긴장재의 최고 편심거리 (f_1)
 점B : 지간중앙의 최저 편심거리 (f_2)
 R_{AC}, R_{BC} : PS긴장재의 원주AC와 BC의 곡률 반경

그림 3 원주형 PS긴장재의 기하학적 형상 (곡률반경, 변곡점, 편심거리)

여기서,

c : 콘크리트 피복두께 + PS긴장재 반지름

b_0 : 기둥 폭

$b_1 : b_0/2$

b_2 : 기둥면에서 전단파괴면과 PS긴장재가 교차하는 점(c)까지의 거리

윗 식을 f_2 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$f_2 = x \tan \psi - (c + b_1 \tan \psi) \tag{5}$$

식 (5)를 식 (2)와 비교하여 k_1 과 k_2 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k_1 = \tan \psi \tag{6}$$

$$k_2 = -(c + b_1 \tan \psi) \tag{7}$$

PSC 평판슬래브의 기둥부위 뚫림 전단으로 인한 위험단면의 기울기가 트러스 이론에 따라 $\psi = \pi/4$ 라고 할 때, 그림 2에서 전단 파괴면과 PS긴장재가 교차하는 위치(c)를 찾을 수 있다. 여기서 $b_1 = \frac{b_0}{2}$ 이므로 k_1 과 k_2 의 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$k_1 = 1 \tag{6.1}$$

$$k_2 = -\left(c + \frac{b_0}{2}\right) \tag{7.1}$$

이와 같이 하여 PSC 평판슬래브 설계시 필요로 하는 PS긴장재 곡선의 특성값($x, f_1, f_2, R_{AC}, R_{BC}, \theta_1, l_{AC}, l_{BC}$)을 식 (8.1)에서부터 식 (8.8)에 따라 계산할 수 있다.

$$x = a \left(\frac{d - k_2}{k_1 a + d} \right) \tag{8.1}$$

$$f_1 = d \left(\frac{d - k_2}{k_1 a + d} \right) \tag{8.2}$$

$$f_2 = d \left(\frac{k_1 a + k_2}{k_1 a + d} \right) \tag{8.3}$$

$$\theta_1 = \theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{2f_2}{(a-x)} \right] \quad (8.4)$$

$$R_{AC} = \frac{f_1}{2\sin^2\left(\frac{\theta_1}{2}\right)} \quad (8.5)$$

$$R_{BC} = \frac{f_2}{2\sin^2\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \quad (8.6)$$

$$l_{AC} = R_{AC} \theta_1 \quad (8.7)$$

$$l_{BC} = R_{BC} \theta_1 \quad (8.8)$$

3. PSC 평판슬래브의 지점 부모멘트

3.1 등가하중 이론에 따른 PS긴장재의 상향력과 하향력

등가하중은 긴장력의 작용으로 부재에 작용하는 하중을 상쇄시키는데 그 목적을 두고 있다. 곧, 휨부재를 축방향력의 수직응력만을 받는 부재로 전환시켜 복잡한 구조물의 설계와 해석을 매우 단순화시키는 것으로, 프리스트레싱에 의한 PS긴장재의 상향력과 하향력을 산정하는 과정은 다음과 같다.

슬래브의 PS긴장재에 정착장치를 통해 긴장력 (P_s)이 도입되면, 그림 4 (a)와 같이 PS긴장재의 곡률반경 (R)에서 접선의 수직방향의 힘 (u_s)이 발생한다.

$$u_s = \frac{P_s}{R} \text{ [kN/m]} \quad (9)$$

PSC 평판슬래브에서 포물선형태의 PS긴장재 곡선이 지간길이 (l)에 비해 편심거리 (f)가 매우 작을 경우 ($\frac{f}{l} \leq \frac{1}{12}$) 근사이론¹¹⁾에 따라 PS긴장재의 접선의 수직방향의 힘 (u_s)은 그림 4의 (b)와 같이 상향력 (u)로 치환될 수 있고, 곡률반경 (R)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{l^2}{8f} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 상향력 (u)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{P_s}{R} = \frac{8P_s f}{l^2} \quad (11)$$

그림 4 (c)에서 볼 수 있듯이 식 (11)에 의해 계산된 상향력 (u)이 지점사이에 등분포 하중으로 작용하면 전체 지간에 부모멘트가 발생하는데, 이 등가하중개념을 평판슬래브에 적용한 예가 그림 5에 제시되어 있다. PSC 연속 평판슬래브에 그림 2와 같이 PS긴장재가 배근되어 프리스트레싱이 도입되면, AC영역의 하향력과 BC영역의 상향력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{AC영역의 하향력} : u = \frac{2f_1 P_s}{x^2} \quad (12)$$

$$\text{BC영역의 상향력} : u = \frac{2f_2 P_s}{(a-x)^2} \quad (13)$$

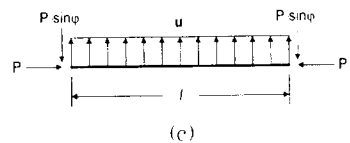
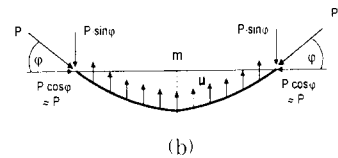
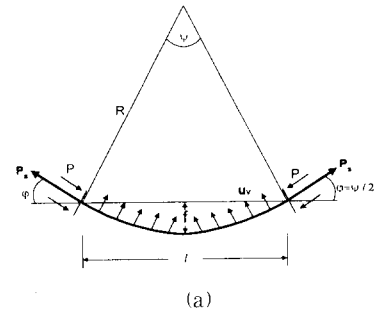


그림 4 등가하중 개념(긴장재를 포물선으로 배치한 경우)

여기서 긴장력에 의해 지점주변에 발생하는 하향력은 지점반력과 반대방향으로 작용하기 때문에 외력에 의한 전단력을 감소시키지만, 지점의 휨모멘트에는 영향을 미치지 않으므로 본 연구에서는 하향력에 따른 영향은 고려하지 않았다.

3.2 PSC 평판슬래브의 상향력(u)과 등분포 하중(q)에 의한 지점 부모멘트

그림 5에서 볼 수 있듯이 곡선 형태로 배치된 PS긴장재를 통하여 평판슬래브에 프리스트레싱을 도입하면 등가하중 이론⁹⁾에 따라 고정하중과 반대방향으로 지점부위에는 위에서 아래로 하향력이 작용하고, 중간대에는 아래에서 위로 상향력(u_x, u_y)이 작용한다.

다경간 PSC 평판슬래브는 복잡한 부정정 구조물이므로 정확한 계산방법으로 부재력을 산정하는 것은 매우 어렵다. 특히 PS긴장재에 의한 상향력이 슬래브에 작용할 경우 내부지간 즉, 지점과 지점사이에서 부모멘트가 발생하기 때문에 전체 지간에서 최소 부모멘트를 계산하는 것은 매우 중요한 의미를 가진다.

평판슬래브에 작용하는 지점 부모멘트를 계산하기 위하여 2방향의 상향력(u_x, u_y)을 계산하여야 한다. 본 절에서는 선형의 판 이론을 기초로 하여 상향력이 X-Y 방향으로 작용할 때 발생하는 평판슬래브의 지점 부모멘트를 간편하게 계산

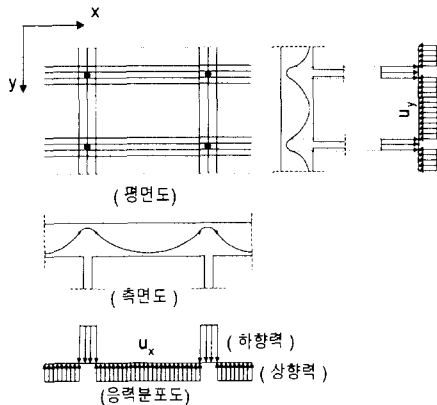


그림 5 PS평판슬래브의 PS긴장재 곡선배치와 상향력

할 수 있는 방법을 제안하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

평판 슬래브에 등분포하중(q)이 작용할 때 슬래브의 선형 판 이론을 기초로 한 편미분방정식을 풀면 다음 식과 같은 일반 해를 구할 수 있다²⁾.

$$Kw = A - \frac{q}{8\pi^5} \left(\frac{l_x^5}{b} \sum_m \frac{1}{m^5} \sin ib \cos 2ix + \frac{l_y^5}{b} \sum_n \frac{1}{n^5} \sin jb \cos 2jy \right) - \frac{q l_x^5 l_y^5}{4b^2 \pi^6} \sum_m \sum_n \frac{\sin ib \sin jb \cos 2ix \cos 2jy}{mn(m^2 l_x^2 + n^2 l_y^2)^2} \quad (14)$$

여기서, $K = \frac{E \cdot d^3}{12(1-\mu^2)}$, $i = \frac{m\pi}{l_x}$, $j = \frac{n\pi}{l_y}$

$$m = n = 1, 2, 3, \dots, \quad b = 2x$$

μ = 프와송비, w = 수직변위,

A = 특성계수

x 방향의 PS긴장재 상향력(u_x) 작용에 대한 판 이론을 따르는 해석의 일반 해는 다음 식과 같고,

$$KLw_x = A_x + \frac{u_x}{8\pi^5} \left[\frac{l_x^5}{bl_y} \sum_m \frac{1}{m^5} \sin ib \cos 2ix + \frac{l_y^4}{b} \sum_n \frac{1}{n^5} (\sin jb - jb) \cos 2jy \right] + \frac{u_x l_x^5 l_y^4}{4b^2 \pi^6} \sum_m \sum_n \frac{\sin ib \sin jb \cos 2ix \cos 2jy}{mn(m^2 l_x^2 + n^2 l_y^2)^2} \quad (15)$$

y 방향의 PS긴장재 상향력(u_y)에 대한 일반 해는 다음 식과 같다.

$$Kw_y = A_y + \frac{u_y}{8\pi^5} \left[\frac{l_x^4}{b} \sum_m \frac{1}{m^5} (\sin ib - ib) \cos 2ix + \frac{l_y^5}{bl_x} \sum_n \frac{1}{n^5} \sin jb \cos 2jy \right] + \frac{u_y l_x^4 l_y^5}{4b^2 \pi^6} \sum_m \sum_n \frac{\sin ib \sin jb \cos 2ix \cos 2jy}{mn(m^2 l_x^2 + n^2 l_y^2)^2} \quad (16)$$

위의 식에서 $\sin ib$ 에 대한 부분적인 합은 다음과 같이 계산된다³⁾.

$$\sum_m \frac{\sin ib}{m^3} = \frac{\left(\frac{\pi}{l_x} b\right)^3 - 3\pi\left(\frac{\pi}{l_x} b\right)^2 + 2\pi^2\left(\frac{\pi}{l_x} b\right)}{12}$$

$$\sum_n \frac{\sin jb}{n^3} = \frac{\left(\frac{\pi}{l_y} b\right)^3 - 3\pi\left(\frac{\pi}{l_y} b\right)^2 + 2\pi^2\left(\frac{\pi}{l_y} b\right)}{12}$$

이와 같이 식 (14), (15), (16)으로부터 그림 6과 같이 평판슬래브에 등분포하중 (q) 과 PS긴장재에 의한 상향력 (u) 이 작용할 때 x-y축의 지점 부모멘트 (m_{sx} , m_{sy})는 다음과 같이 계산할 수 있다.

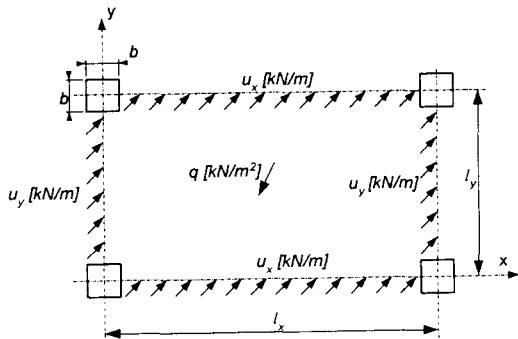
a) 등분포하중 (q) 작용시

· x방향의 지점 부모멘트 m_{sx} ;

$$\frac{-m_{sx}}{l_x l_y q} = \frac{l_x}{12 l_y} + \frac{b}{l_y} \left(\frac{b}{24 l_x} - \frac{1}{8} \right) + \frac{l_y^4}{l_x^2 b^2 \pi^4} \times \alpha \quad (17)$$

· y방향의 지점 부모멘트 m_{sy} ;

$$\frac{-m_{sy}}{l_x l_y q} = \frac{l_y}{12 l_x} + \frac{b}{l_x} \left(\frac{b}{24 l_y} - \frac{1}{8} \right) + \frac{l_x^2}{b^2 \pi^4} \times \beta \quad (18)$$



u_x = x방향의 PS긴장재 상향력 [kN/m]
 u_y = y방향의 PS긴장재 상향력 [kN/m]
 q = 고정하중으로 인한 등분포하중 [kN/m²]
 b = PS긴장재 곡선의 변곡점

그림 6 PS평판슬래브의 작용하중

b) PS긴장재에 의한 상향력 (u) 작용시

· x축 상향력 (u_x) 작용시 x방향의 지점 부모멘트 m_{sx} ;

$$\frac{m_{sx}}{l_x u_x} = \frac{l_x}{12 l_y} + \frac{b}{l_y} \left(\frac{b}{24 l_x} - \frac{1}{8} \right) + \frac{l_y^4}{l_x^2 b^2 \pi^4} \times \alpha \quad (19)$$

· x축 상향력 (u_x) 작용시 y방향의 지점 부모멘트 m_{sy} ;

$$\frac{m_{sy}}{l_x u_x} = \frac{b}{l_x} \left(\frac{b}{24 l_y} - \frac{1}{8} \right) + \frac{l_y^2}{b^2 \pi^4} \times \beta \quad (20)$$

· y축 상향력 (u_y) 작용시 x방향의 지점 부모멘트 m_{sx} ;

$$\frac{m_{sx}}{l_y u_y} = \frac{b}{l_y} \left(\frac{b}{24 l_x} - \frac{1}{8} \right) + \frac{l_x^4}{l_y^2 b^2 \pi^4} \times \alpha \quad (21)$$

· y축 상향력 (u_y) 작용시 y방향의 지점 부모멘트 m_{sy} ;

$$\frac{m_{sy}}{l_x u_y} = \frac{l_y}{12 l_x} + \frac{b}{l_x} \left(\frac{b}{24 l_y} - \frac{1}{8} \right) + \frac{l_x^2}{b^2 \pi^4} \times \beta \quad (22)$$

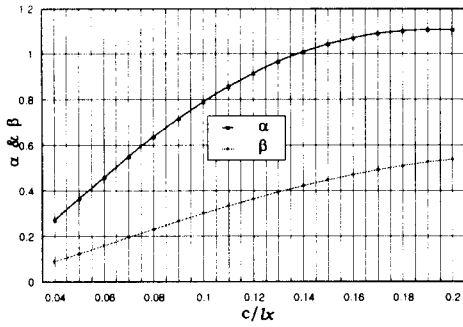
윗 식에서 α 와 β 는 다음과 같으며,

$$\alpha = \sum_m \sum_n \frac{m \cdot \sin ib \cdot \sin jb}{n \left(m^2 \frac{l_y^2}{l_x^2} + n^2 \right)^2}$$

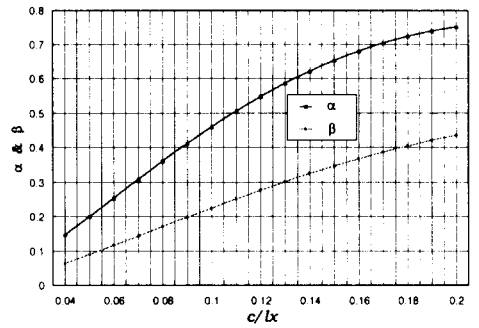
$$\beta = \sum_m \sum_n \frac{n \cdot \sin ib \cdot \sin jb}{m \left(m^2 \frac{l_y^2}{l_x^2} + n^2 \right)^2}$$

α 와 β 의 값은 l_x/l_y 의 비에 따라서 그림 7에 제시하였다.

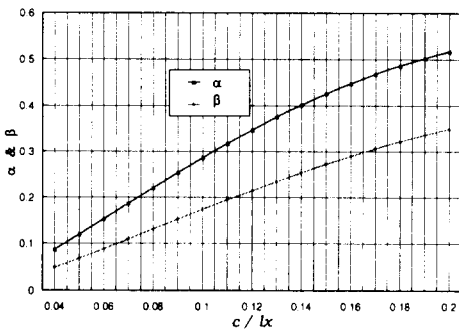
부착되지 않은 PSC 연속 평판슬래브는 지간 길이 (l_x , l_y)가 l 에 비해 매우 크기 때문에 식 (17) ~ (22)은 다음의 근사식으로 간편하게 지점 부모멘트를 계산할 수 있다.



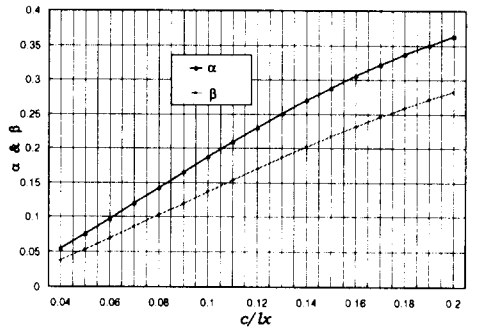
(a) $l_y/l_x = 0.5$



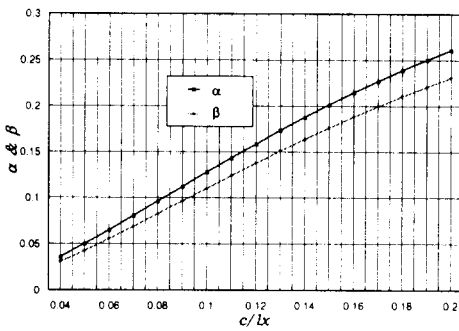
(b) $l_y/l_x = 0.6$



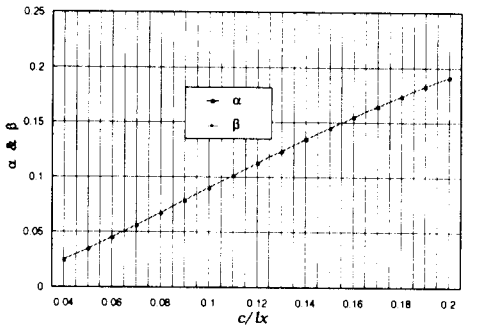
(c) $l_y/l_x = 0.7$



(d) $l_y/l_x = 0.8$



(e) $l_y/l_x = 0.9$



(f) $l_y/l_x = 1.0$

그림 7 부모멘트 산정을 위한 α, β 값

$$\frac{-m_{x_r}}{l_y l_y q} = \frac{l_x}{12l_y} - \frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^3}{l_x^2 b^2 \pi^4} \times \alpha \quad (17.1)$$

$$\frac{m_{y_r}}{l_x u_x} = -\frac{b}{8l_x} + \frac{l_x^2}{b^2 \pi^4} \times \beta \quad (20.1)$$

$$\frac{-m_{x_y}}{l_x l_y q} = \frac{l_y}{12l_x} - \frac{b}{8l_x} + \frac{l_y^2}{b^2 \pi^4} \times \beta \quad (18.1)$$

$$\frac{m_{x_y}}{l_y u_y} = -\frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^3}{l_x^2 b^2 \pi^4} \times \alpha \quad (21.1)$$

$$\frac{m_{x_r}}{l_x u_x} = \frac{l_x}{12l_y} - \frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^3}{l_x^2 b^2 \pi^4} \times \alpha \quad (19.1)$$

$$\frac{m_{x_y}}{l_y u_y} = \frac{l_y}{12l_x} - \frac{b}{8l_x} + \frac{l_x^2}{b^2 \pi^4} \times \beta \quad (22.1)$$

이와 같이 2방향 PSC 평판슬래브에 프리스트레싱이 도입되고, 등분포형태의 연직하중이 작용할 경우 지점 부모멘트의 크기를 선형의 판 이론에 적용하여 간편하게 계산할 수 있다.

4. PSC 평판슬래브 설계 예

4.1 PSC 평판슬래브 설계

PSC 평판슬래브의 설계 예에서는 그림 8과 같은 3경간 연속 PSC 평판슬래브의 내부기둥 1, 2, 3, 4에 발생하는 부모멘트(m_{sx} , m_{sy})를 산정하였다.

1) 부재제원

- (a) 슬래브 지간거리 : $l_x=15.0\text{m}$, $l_y=10\text{m}$
- (b) 슬래브 두께 : $h=40\text{cm}$,
슬래브 유효높이 : $d=30\text{cm}$
- (c) 기둥폭 : $b_n=60\text{cm} \times 60\text{cm}$

2) 하중조건

- (a) PS 유효 긴장력 : $P_{sx}=6500\text{kN}$,
 $P_{sy}=1800\text{kN}$
- (b) 등분포하중=사하중+활하중 :
 $q=13.5\text{kN/m}^2$

3) PS강연선의 배치곡선 형태

2절과 3절의 관계식에 의해 산정한 x-y축 상의 PS긴장재 곡선의 특성값은 다음 표 1과 같다.

· PS긴장재에 의한 상향력(u)

$$u_x = \frac{2f_2 P_{sx}}{\left(\frac{l_x}{2} - x\right)^2} = 75.5\text{kN/m}$$

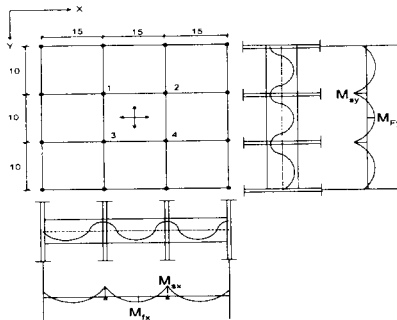


그림 8 PSC 평판슬래브의 모멘트

표 1 PS긴장재 곡선의 특성값

	x축방향	y축방향
x (cm)	62	61
f_1 (cm)	2.5	3.6
f_2 (cm)	27.5	26.0
R_{4C} (cm)	767	51
R_{4K} (cm)	861	369
θ (°)	4.6	6.8
l_{4C} (cm)	62	61
l_{4K} (cm)	690	440

$$u_y = \frac{2f_2 P_{sy}}{\left(\frac{l_y}{2} - x\right)^2} = 48.6\text{kN/m}$$

4) 기둥의 부모멘트(m_s) 산정

(a) 부모멘트 계산을 위한 특성계수

- $b=2 \times x=1.24\text{m}$
- $b/l_x=1.24/15.0=0.082$
- $l_y/l_x=10/15.0=0.67$
- $\alpha=0.278$, $\beta=0.155$

(b) 기둥 부모멘트

- 등분포 하중(q)에 의한 지점 부모멘트(m_{sx1} , m_{sy1}) :

$$m_{sx1} = -l_x l_y q \left(\frac{l_x}{12l_y} - \frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^4}{l_x^2 b^2 \pi^4} \cdot \alpha \right)$$

$$= -389.1\text{kN} \cdot \text{m/m}$$

$$m_{sy1} = -l_x l_y q \left(\frac{l_y}{12l_x} - \frac{b}{8l_x} + \frac{l_y^2}{b^2 \pi^4} \cdot \beta \right)$$

$$= -301.1\text{kN} \cdot \text{m/m}$$

- 상향력(u_x)에 의해 발생한 지점 부모멘트(m_{sx2} , m_{sy2}) :

$$m_{sx2} = l_x \cdot u_x \left(\frac{l_x}{12l_y} - \frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^4}{l_x^2 \cdot b^2 \cdot \pi^4} \cdot \alpha \right)$$

$$= 217.6 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$m_{sy2} = l_x \cdot u_x \left(-\frac{b}{8l_x} + \frac{l_y^2}{b^2 \cdot \pi^4} \cdot \beta \right)$$

$$= 105.7 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

- 상향력(u_y)에 의해 발생한 지점 부모멘트(m_{sx3} , m_{sy3}) :

$$m_{sx3} = l_y \cdot u_y \left(-\frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^4}{l_x^2 \cdot b^2 \cdot \pi^4} \cdot \alpha \right)$$

$$= 32.6 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$m_{sy3} = l_y \cdot u_y \left(\frac{l_y}{12l_x} - \frac{b}{8l_y} + \frac{l_y^2}{b^2 \cdot \pi^4} \cdot \beta \right)$$

$$= 72.1 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

PSC 연속 평판슬래브에 등분포하중(q)과 PS긴장재의 프리스트레싱에 의한 상향력(u_x, u_y)이 작용할 때 기둥지점의 전체 부모멘트(m_{sx}, m_{sy})의 크기는 다음과 같다.

$$\sum m_{sx} = m_{sx1} + m_{sx2} + m_{sx3} = -138.9 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$\sum m_{sy} = m_{sy1} + m_{sy2} + m_{sy3} = -123.3 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

4.2 PSC 평판슬래브의 FEM 해석 결과

0 그림 9와 같이 PSC 평판슬래브의 4개 기둥에 발생하는 부모멘트(m_{sx}, m_{sy})를 계산하기 위하여 Shell 요소를 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

대상 슬래브는 등방성의 4 절점 쉘(Shell) 요소로 각 절점은 5개의 자유도를 갖도록 모델링 되었으며, 기둥은 8절점 요소로 모델링 하였다. 해석결과 PSC 평판슬래브에 등분포하중(q)가 작용할 때 발생하는 처짐의 형상을 그림 10에서 보여주고 있다.

4.3 구조설계 비교검토

4.1절에서 산정한 PS긴장력에 의한 상향력(u)과 등분포 하중(q)으로 발생하는 지점 부모멘트(m_{sx}, m_{sy})값을 본 연구에서 제시한 이론 값과

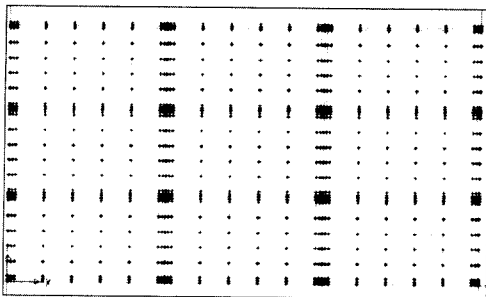


그림 9 평판슬래브의 FEM 모델링

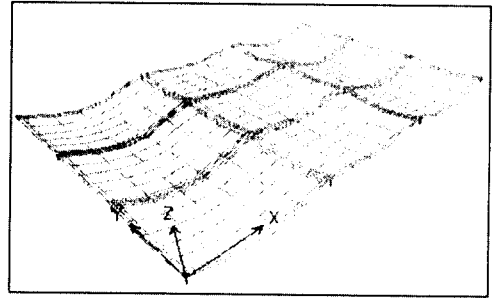
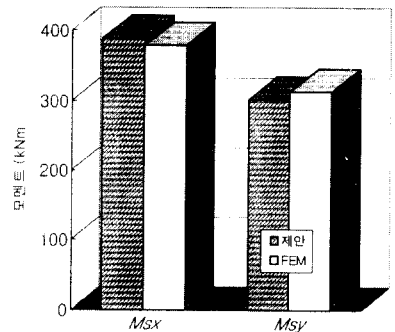


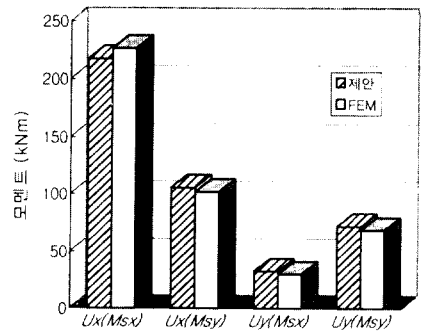
그림 10 등분포하중에 의한 평판슬래브의 처짐

FEM해석에 의한 부모멘트를 비교·검토하였으며, 그 결과는 그림 11의 그래프로 나타내었다.

제안식과 FEM해석 결과를 비교한 결과 10% 이내에서 서로 비슷한 결과를 잘 보여주고 있다. 하지만 서로간에 해석결과의 확실적인 유사성은 발견할 수 없었다.



(a) 등분포하중(q)에 의한 모멘트



(b) 상향력(U)에 의한 모멘트

그림 11 PSC평판슬래브의 해석결과 비교

5. 결 론

본 논문에서는 연속 평판슬래브에 PS긴장재를 배치할 경우 2차함수로 구성된 기존의 포물선식 대신에 원의 곡선식을 이용한 간단하고 명확한 설계식을 제안하여, 평판슬래브 설계시 문제가 되는 PS긴장재의 배치를 쉽게 설계할 수 있게 하였다. 그리고 PS긴장재에 프리스트레싱이 도입되어 슬래브에 상향력이 작용할 때, 기둥 지점부에서 발생하는 부모멘트를 정확하고도 간단히 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

PS평판 슬래브 구조설계 예를 통하여, 본 논문에서 제시한 곡선식과 부모멘트 산정식을 이용하여 산정한 지점부위의 부모멘트 값과 컴퓨터 해석에 의한 부모멘트 값을 비교·검토하였다. 등분포 하중(q) 작용시 제안식에 의한 지점 부모멘트는 X, Y방향 각각 FEM해석결과의 2.71%, -4.11%이며, 상향력(u_x, u_y)에 의한 지점 부모멘트는 X, Y방향 각각 FEM해석결과의 3.89%, -3.53%, 8.67%, 4.64%로 FEM해석결과와 매우 잘 일치하므로 본연구의 이론은 타당하다고 판단된다.

실제 PSC평판슬래브를 설계할때 유한요소 해석에 따른 컴퓨터의 해석결과를 쉽게 검토할 수 없었다. 하지만 본 연구에서는 지점 부모멘트를 간단하고 정확하게 계산할 수 있으므로 실제 구조물 설계시 설계자의 오류를 방지할 수 있는 매우 효과적인 검증방법이라 사료된다.

참 고 문 헌

- DIN 4227, Teil 6, Anhang A, Mai, 1982.
- Girkmann, K., "Flaechentragwerke", Springer-Verlag, Wien, 1963.
- Bronstein, I.N., "Taschenbuch der Mathematik", Verlag Harri Deutsch. 24 Auflage. Frankfurt/M.
- Bercea, G., "Spanngliedfuehrung in Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund", Bautechnik 66, H.1, 1989, pp.13~16.
- Kuettner, D., "Innenfeld einer Flachdecke unter Gleichlast und Stuetzenstreifen Vorspannung", Beton und Stahlbetonbau 86, H.3, 1991, pp.49~50.
- Stahlton AG Zuerich, "Vorgespannte Flaechdecken." Hombrechtikon Druck AG, 1982.
- Woeffel, E., "Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund", Bauingenieur 55, H5, 1980, pp.185~190.
- Grasser, E., "Bemessung von Beton-und Stahlbetonbauteilen, Biegung mit Laengskraft, Schub, Torsion", DAFStb, H.240, 1979.
- Lin, T. Y., "Load Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures", *ACI Journal*, Proceedings 60, 1963. pp.719~742.
- Frasser, D. J., "Simplified Frame Analysis for Flat Plate Construction", *Concrete International: Design & Costruction*, Sep. 1984, pp.32~41.
- Specht, M., "Lehrstoff des Stahlbetonbaus (Grundlagen des Spannbetons)" TU Berlin F.G Stahlbetonbau, 1993.
- A. J. MacRae, M. Z. Cohn, " Optimization of Prestressed Concrete Flat Plates", Vol. 113, No. 5, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, May 1987, pp.943~957.
- Paul N. Roschke, Masamichi Inoue, "Effects of Banded Post-Tensioning in Prestressed Concrete Flat Slab", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 2, Feb. 1991, pp.563~583.
- Kenneth W. Shushkewich, "Simplified Equivalent Loads of Prestressing", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No.11, Nov. 1991, pp.3538~3542.
- Y. H. Luo, A. J. Durrani, "Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings-Part I : Interior Connections", *ACI Structural Journal*, Jan.~Feb. 1995, pp.115~124.
- Y. H. Luo, A.J.Durrani, "Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings-Part II : Exterior Connections", *ACI Structural Journal*, Mar.~Apr.1995, pp.250~257.
- Stephen Pessiki, Wilem Van Zyverden, Richard Sause, Sarah Slaughter, "Proposed Concepts for Floor Framing Systems for Precast/Prestressed Concrete Office Buildings", *PCI*, Sep.~Oct. 1997, pp.66~74.

(접수일자 : 1998. 8. 10)