

프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 사용성 평가

Serviceability of Prestressed Concrete One-Way Slab



이 영 학*
Lee, Young Hak

1. 프리스트레스트 콘크리트 시스템의 개요

프리스트레스트 콘크리트 구조는 긴장재에 가해지는 긴장력을 이용하여 미리 압축응력을 발생 시켜서 인장응력의 크기를 효과적으로 감소시킬 수 있도록 설계된 구조이다. 따라서 기존의 철근콘크리트 구조에 비해 강도가 증가하고 단면적이 감소하며 경간이 길어지기 때문에 경제적인 설계가 가능하다. 하지만 철근콘크리트 구조보다 부재의 두께가 얇기 때문에 휨 균열에 의해 더 많은 영향을 받게 된다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 부재의 거동은 처짐에 대한 사용성 평가에 더 많은 주안점을 두어야 한다. 국내 콘크리트 구조설계기준과 ACI Building Code(ACI Committee 318 2014)에서는 철근콘크리트 부재의 처짐을 제한하기 위해

콘크리트 수평부재의 최소두께를 제시하고 있으며, 부재의 두께가 제시된 최소두께와 같거나 클 경우 처짐은 계산하지 않아도 되도록 규정하고 있다. 반면, 프리스트레스트 부재는 모든 프리스트레스트 휨부재에 대하여 처짐을 계산하고, 규준에서 제시하는 처짐 제한 값과 비교할 것을 요구하고 있다.

국내에서 철근콘크리트 부재의 처짐에 관한 연구는 지속적으로 선행되었으나, 프리스트레스트 부재의 처짐에 대한 연구는 상대적으로 많이 미흡한 실정이다. 문정호와 이리형(1995)은 부착되어 있거나 부착되어 있지 않는 긴장재를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 구조부재의 해석이 가능한 프로그램을 제안하고, 실험결과와 해석결과의 비교를 통해 프로그램의 타당성을 검토하였다. 이승철과 이영학(2011)은 이방향 포스트텐션 슬래브에서 긴장재의 배치에 따른 효과를 분석하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 프리스트레스트 콘크리트 부재의 강도 및 거동 평가에 중점을 둔 연구는 다수 수행되었지만, 처짐에 영향을 미치는 변수에 대한 연구는

* 경희대학교 건축공학과
Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University

여전히 부족한 실정이다. 본 기사에서는 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 처짐을 해석하는 방법론에 대해 간략하게 논하였다. 이를 위해 상용 유한요소 해석프로그램인 SAP2000을 사용하였으며, 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다.

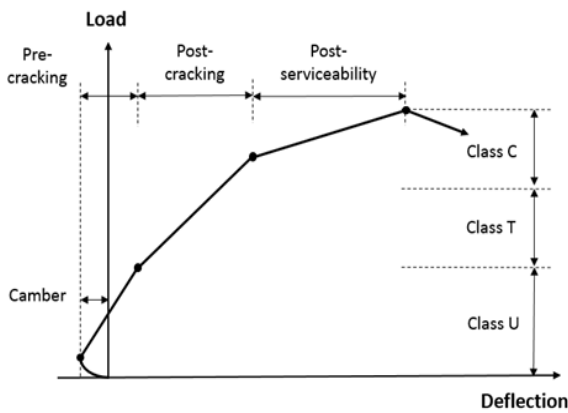
2. 프리스트레스트 콘크리트의 처짐

2.1 ACI Building Code

ACI Building Code에서 프리스트레스트 콘크리트 휨부재는 미리 압축을 가한 인장구역에서 사용 하중에 의한 인장연단응력에 따라 <Fig. 1>과 같이 세 단계로 구분된다. 등급을 구분하는 기준은 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> Classification of prestressed flexural members

Class U	$f_t \leq 0.62\sqrt{f'_c}$
Class T	$0.63\sqrt{f'_c} < f_t \leq 1.0\sqrt{f'_c}$
Class C	$f_t > 1.0\sqrt{f'_c}$



<Fig. 1> Load-deflection curve of prestressed concrete members

Class U 부재는 최종하중단계에서 콘크리트의 인장응력이 제한되어 균열이 발생하지 않는 부재이며, 비균열단면으로 거동하는 것으로 가정하고 처짐을 계산할 때 전체 단면에 대한 전단면2차모멘트를 사

용한다. Class T 부재는 최종하중단계에서 폭이 작은 균열을 허용하는 부재이며, Class U와 Class C의 중간 수준으로 거동하는 것으로 가정하여 처짐을 계산할 때에 균열단면2차모멘트를 사용한다. Class C 부재는 최종하중단계에서 콘크리트의 인장응력에 대한 제한이 없으므로 폭이 큰 균열이 발생할 수 있는 부재이며, 균열단면으로 거동한다고 가정하여 처짐을 계산할 때에 균열단면2차모멘트를 사용한다.

<Table 2> Maximum permissible computed deflections

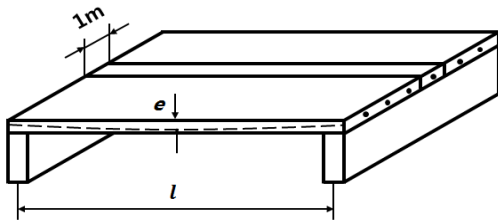
Type of member	Deflection to be considered	Deflection limitation
Flat roofs not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to live load L	$\frac{l}{180}$
Floor not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to live load L	$\frac{l}{360}$
Roof or floor construction supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	That part of the total deflection occurring after attachment of nonstructural elements (sum of the long-term deflection due to all sustained loads and the immediate deflection due to any additional live load)	$\frac{l}{480}$
Roof or floor construction supporting or attached to nonstructural elements not likely to be damaged by large deflections	That part of the total deflection occurring after attachment of nonstructural elements (sum of the long-term deflection due to all sustained loads and the immediate deflection due to any additional live load)	$\frac{l}{240}$

프리스트레스트 부재의 순간처짐은 기존 역학방법인 공액보법에 따라 탄성처짐 공식으로 계산하여야 한다. 전체 처짐은 프리스트레싱에 의한 솟음과 부재의 처짐을 합하여 계산하며, 이는 콘크리트 탄성계수와 균열발생여부에 따라 달라지는 단면2차모

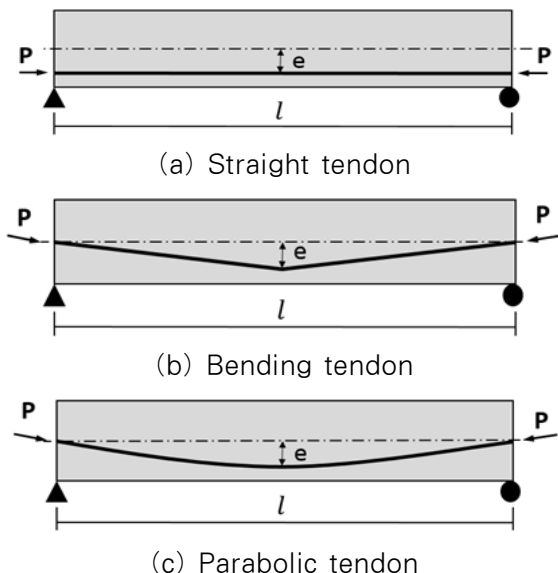
멘트를 대입하여 계산할 수 있다. 계산된 전체 처짐은 다음 <Table 2>의 처짐 한계 값과 비교하여 초과여부를 판단한다.

2.2 일방향 슬래브의 처짐 계산

ACI Building Code에서 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 처짐 계산은 PCI design handbook (PCI Industry Handbook Committee)을 참조하도록 제시하고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전체 처짐은 솟음과 처짐을 합하여 계산한다. 본 논문에서는 대응하는 두 변으로만 지지된 경우와 네 변이 지지되고 장변의 길이가 단변의 길이의 2배를 초과하는 경우의 일방향 슬래브를 해석대상으로 한다. 일방향 슬래브의 처짐은 <Fig. 2>와 같이 폭이 1m인 보로 보고 계산하거나, 단변 방향의 경간을 사용하여 계산한다. 이 때, 긴장재의 배치 형태



<Fig. 2> Prestressed one-way slab



<Fig. 3> Types of tendon profile

를 나타낸 그림은 <Fig. 3>과 같다. 직선 형태 긴장재를 사용한 부재의 솟음을 구하는 식 (1), 절곡 형태 긴장재를 사용한 부재의 솟음을 구하는 식 (2), 그리고 곡선 형태 긴장재를 사용한 부재의 솟음을 구하는 식 (3)은 다음과 같다.

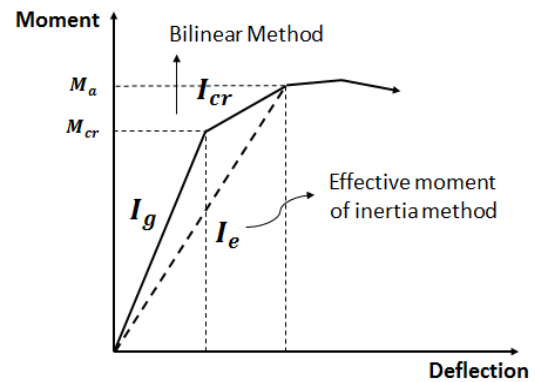
$$\Delta_{P_{max}} = -\frac{1}{8} \frac{Pel^2}{EI} \quad (1)$$

$$\Delta_{P_{max}} = -\frac{1}{12} \frac{Pel^2}{EI} \quad (2)$$

$$\Delta_{P_{max}} = -\frac{5}{48} \frac{Pel^2}{EI} \quad (3)$$

여기서, P는 긴장력, e는 편심거리, l은 스패ん 길이를 의미하며, E는 콘크리트 탄성계수, I는 단면2차모멘트를 나타낸다.

비균열부재의 처짐은 균열이 일어나지 않은 콘크리트 전체 단면에 대한 단면2차모멘트와 규정된 콘크리트에 대한 탄성계수를 사용하여 구한다. 균열 부재의 처짐을 구하는 방법은 유효단면2차모멘트를 이용하는 방법과 이단선형법(Bilinear Method)을 제시하고 있다. <Fig. 4>는 두 가지 방법을 비교하여 보여주는 그림이다.



<Fig. 4> Deflection calculations for cracked prestressed member

균열이 발생할 경우에 균열면과 비균열면을 정확하게 구분하여 단면2차모멘트를 합하는 것은 어려

우므로, 설계에서는 균열이 발생한 이후의 부재의 단면2차모멘트를 균열면에서의 단면2차모멘트와 비균열면에서의 단면2차모멘트의 평균값인 유효단면2차모멘트로 계산한다. 유효단면2차모멘트의 식 (4)는 다음과 같다.

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

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = 1 - \frac{f_{tl} - f_r}{f_l} \quad (4)$$

여기서, I_g 는 콘크리트 총 단면에 대한 단면2차모멘트, I_{cr} 은 균열환산단면에 대한 단면2차모멘트, f_r 은 콘크리트의 인장강도를 나타내며, f_{tl} 은 부재에서 최종적으로 계산된 총 응력, f_l 은 활하중에 의한 응력을 나타낸다.

이단선형법은 휨균열발생을 경계로 하여 균열이 발생하기 전에는 전단면2차모멘트를 사용하여 처짐을 계산하고, 휨균열이 발생한 후에는 균열단면2차모멘트를 이용하여 처짐을 계산한 후에 두 값을 더하는 방법이다. 이 때 균열단면 2차모멘트는 정확한 계산 대신, 다음과 같은 식 (5)를 사용한다.

$$I_{cr} = n_p A_{ps} d_p^2 (1 - 1.6 \sqrt{n_p \rho_p}) \quad (5)$$

여기서, n_p 는 긴장재의 탄성계수비, A_{ps} 는 긴장재의 단면적, d_p 는 압축연단에서 긴장재 단면 중심까지의 거리를 나타내며, ρ_p 는 긴장재의 비(= $A_{ps}/(b \cdot d_p)$)를 나타낸다.

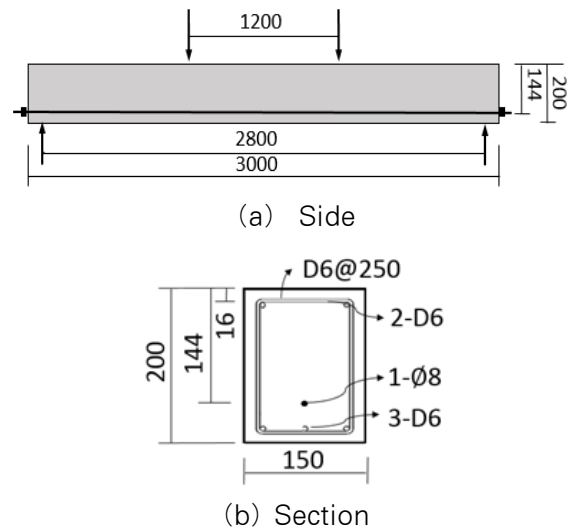
3. 해석결과와 실험결과와의 평가

본 연구에서는 프리스트레스트된 일방향 슬래브의 처짐 해석을 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 콘크리트 탄성계수는 $4700\sqrt{f_c}$ MPa을 사용하였으며, 철근과 긴장재의 탄성계수는 200,000MPa로 사용하였다. 프로그램을

사용한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 기존 연구자들의 프리스트레스트 콘크리트 일방향 부재의 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 사용하중 내에서는 부재에 균열이 발생하지 않거나 균열 폭이 작으므로 재료는 탄성거동 하는 것을 전제로 하여 해석하였다. 또한 사용하중을 받을 때에는 장기응력손실로 인해 변화되는 응력손실 값이 크지 않기 때문에 긴장력의 변화는 없다고 가정하였다.

3.1 Vu et al.(2010)의 실험

Vu et al.(2010)은 <Fig. 5>와 같이 상부 2점 대칭 하중을 받는 포스트텐션 콘크리트 보의 휨 거동을 평가하였다. 시험체의 전체 길이는 3000mm이며, 지점 중심간 길이는 2800mm이다. 또한 단면의 폭과 깊이는 각각 150mm와 200mm이다. 직경 6mm의 철근과 직경 8mm의 긴장재가 사용되었으며, 긴장재는 직선 형태로 배치되었다. 콘크리트의 압축강도는 45MPa이며, 피복두께는 16mm이다. 긴장재에 가해진 프리스트레싱력은 54kN이다. 요소는 길이방향으로 20개를 모델링 하였으며, 지점조건은 단순 지지로 모델링하였다.



<Fig. 5> Specimen configuration of Vu et al.(2010) experiment

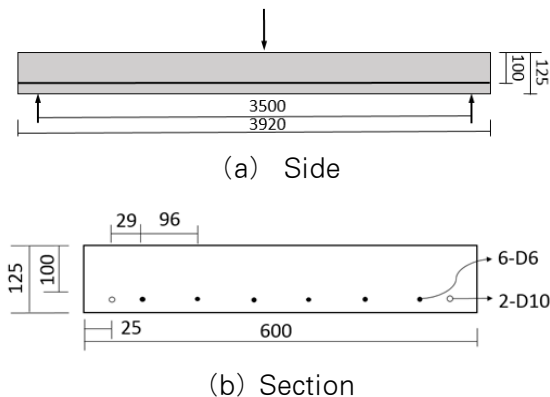
본 연구는 사용하중 하에서의 프리스트레스트 콘크리트 슬래브의 처짐을 평가하는 것에 주안점을 두었기 때문에 사용하중 수준의 하중에 따른 처짐값을 비교하였다. 해석시, Beam No.1의 최대하중의 의 40% 수준인 약 15 kN의 하중을 재하하였으며, 이 때 발생한 처짐값은 1.79mm이다. <Table 3>에 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 나타내었다. 해석 결과와 실험 결과의 비가 0.91로, 해석모델이 처짐을 다소 과소평가하는 것으로 나타났다. 이는 재료, 제작 환경 등에 따라 강도가 달라지는 변동성이 큰 콘크리트의 특성에 기인한 것으로 판단되기 때문에 이를 고려했을 때, 90% 정도의 예측은 비교적 정확한 결과라 사료된다.

<Table 3> Result of verification of Vu et al.(2010) experiment

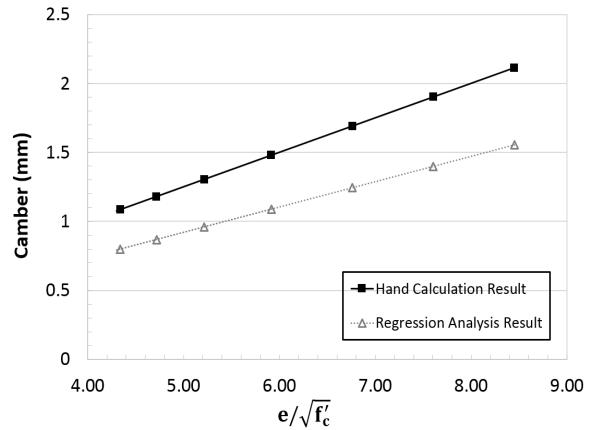
	Experiment	Finite Element Analysis
Deflection	1.97 mm	1.79 mm
FEM /Experiment	0.91	

3.2 Yang et al.(2013)의 실험

Yang et al.(2013)은 <Fig. 6>과 같이 상부의 집중하중을 받는 포스트텐션 콘크리트 일방향 슬래브의 휨 거동을 평가하였다. 시험체의 전체 길이는 3920mm이며 지점 중심간 길이는 3500mm이다. 또



<Fig. 6> Specimen configuration of Yang et al.(2013) experiment



<Fig. 7> Comparison of hand calculation result and regression analysis result

한 단면의 폭과 깊이는 각각 600mm와 125mm이다. 직경 10mm의 철근과 직경 6mm의 긴장재가 사용되었으며, 긴장재는 직선 형태로 배치되었다. 콘크리트의 압축강도는 30MPa이며, 피복두께는 25 mm이다. 긴장재에 가해진 프리스트레싱력은 162 kN이다. 요소는 길이방향으로 20개를 모델링하였으며, 지점 조건은 단순지지로 모델링하였다.

사용하중 수준의 하중에 따른 처짐값을 비교하였으며, S-35의 최대하중의 40% 수준인 약 10.37 kN의 하중을 재하하였으며, 이 때 발생한 처짐값은 4.09mm이다. 실험 결과와 해석 결과를 비교한 표를 보면, 해석 결과와 실험 결과의 오차가 약 12%인 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 모델링 방법은 프리스트레스트 일방향 슬래브가 사용하중을 받을 때의 처짐을 비교적 유사하게 예측한다고 판단된다.

<Table 4> Result of verification of Yang et al.(2013) experiment

	Experiment	Finite Element Analysis
Deflection	4.66 mm	4.09 mm
FEM /Experiment	0.88	

4. 결론

본 기사에서는 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 사용성 평가를 위한 처짐을 분석하기 위하여 유한요소법에 기반한 해석적 방법에 대해 논하였다. 본 기사에서 기술한 상용 유한요소해석 프로그램을 사용한 해석적 방법을 통한 결과와 타 연구자들의 실험결과를 비교한 결과, 사용하중을 받을 때의 처짐을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 다만, 상술한 해석방법은 사용성 평가에 기반을 둔 처짐해석으로 국한되며, 파괴하중에 도달할 때까지의 거동에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Lightweight Concrete One-way Slabs,” *Engineering Structures*, Vol. 56, 2013, pp. 1295–1307.

References

1. Moon, J. H. and Lee, L. H., “Analysis of Prestressed Continuous Members with Unbonded Tendons”, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, Vol. 8, No. 4, 1995 pp. 75~85.
2. Lee, S. C., and Lee, Y. H., “Behavior of Post-Tensioned Two-Way Slabs Depending on Tendon Layout”, *Journal of Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 6, 2011, pp53–59.
3. ACI Committee 318–11, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318–11)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2011, pp.503.
4. PCI Industry Handbook Committee, “PCI design handbook Precast and Prestressed Concrete Fifth Edition,” *Precast/Prestressed Concrete Institute*, U.S.A., pp.632.
5. Vu, N. A., Castel, A., and Francois, R., “Response of Post-tensioned Concrete Beams with Unbonded Tendons including Service-ability and Ultimate State,” *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 2, 2010, pp.556–569
6. Yang, K. H., Mun, J. H., and Kim, G. H., “Flexural Behavior of Post-tensioned Normal