

사용성 평가를 위한 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 처짐 변수 해석

박 하 은¹ · 김 민 숙¹ · 이 영 학^{1*}

¹경희대학교 건축공학과

A Parametric Study of Deflection Analysis of the Prestressed Concrete One-Way Slab for Serviceability Assessment

Ha Eun Park¹, Min Sook Kim¹ and Young Hak Lee^{1*}

¹Department of Architecture Engineering, KyungHee Univ., Yongin, 446-701, Korea

Abstract

The purpose of this study is to analyze the deflection for serviceability assessment of the prestressed concrete one-way slab using finite element program. Proposed finite element analysis method was verified comparing with existing experimental results, and it showed a good agreement. Also, a parametric study has been conducted to analyze the influence of concrete compressive strength, eccentricity, live load, and tendon profile. The finite element analysis results were compared with hand calculation results. Deflections were decreased as the concrete compressive strength increases, eccentricity increases, and the live load decreases. The deflection of straight tendon was smallest. And regression analysis has been conducted to analyze the correlation between parameters and camber.

Keywords : prestressed one-way slab, deflection, parametric study, serviceability

1. 연구의 배경 및 목적

프리스트레스트 콘크리트 구조는 고강도 콘크리트와 강재가 개발된 이후에 교량, 장경간 구조물 등을 비롯하여 건축 및 토목구조물에 널리 사용되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 구조는 긴장재에 가해지는 긴장력을 이용하여 미리 압축응력을 발생시키고 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, 2011)에서는 철근콘크리트

부재의 처짐을 제한하기 위해 최소두께를 제시하고 있으며, 부재의 두께가 제시된 최소두께와 같거나 클 경우 처짐은 계산하지 않아도 된다. 이와 다르게 프리스트레스트 부재는 모든 프리스트레스트 휨부재에 대하여 처짐을 계산하고, 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. Moon 등(1995)은 부착되어 있거나 부착되어 있지 않는 긴장재를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 구조부재의 해석이 가능한 프로그램을 제안하고, 실험결과와 해석결과를 비교를 통해 프로그램의 타당성을 검토하였다. Lee 등(2011)은 이방향 포스트텐션 슬래브에서 긴장재의 배치에 따른 효과를 분석하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. Wu 등(2001)은 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 콘크리트와 긴장재 사이의 부착 및 마

* Corresponding author:

Tel: +82-31-201-3815; E-mail: leeyh@khu.ac.kr
Received October 23 2014; Revised November 8 2014
Accepted November 10 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

찰의 영향을 고려할 수 있는 유한요소해석 모델을 제안하였다. 프리스트레스트 콘크리트 부재의 강도 및 거동 평가에 중점을 둔 연구는 다수 수행되었지만, 처짐에 영향을 미치는 변수에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 압축강도, 편심 거리, 활하중, 그리고 긴장재의 배치형태를 변수로 두어 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 처짐을 해석하였다. 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였으며, 해석결과와 실험결과를 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다. 해석결과를 바탕으로 향후 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 사용성 평가 연구에 기초자료를 제공하는 것에 목적을 두었다.

2. 프리스트레스트 콘크리트의 처짐

2.1 ACI Building Code

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

Class U 부재는 최종하중단계에서 콘크리트의 인장응력이 제한되어 균열이 발생하지 않는 부재이며, 비균열단면으로 거동하는 것으로 가정하고 처짐을 계산할 때 전체 단면에 대한 전단면2차모멘트를 사용한다. Class T 부재는 최종하중단계에서 폭이 작은 균열을 허용하는 부재이며, Class U와 Class C의 중간 수준으로 거동하는 것으로 가정하여 처

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	$f_t > 1.0 \sqrt{f'_c}$

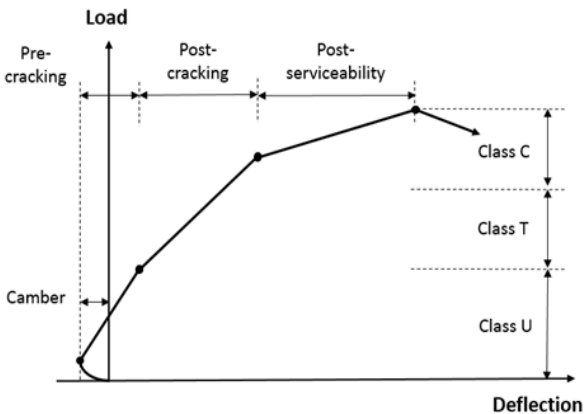


Fig. 1 Load-deflection curve of prestressed concrete members

짐을 계산할 때에 균열단면2차모멘트를 사용한다. Class C 부재는 최종하중단계에서 콘크리트의 인장응력에 대한 제한이 없으므로 폭이 큰 균열이 발생할 수 있는 부재이며, 균열 단면으로 거동한다고 가정하여 처짐을 계산할 때에 균열단면 2차모멘트를 사용한다.

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 단면2차모멘트를 대입하여 계산할 수 있다. 계산된 전체 처짐은 다음 Table 2의 처짐 한계 값과 비교하여 초과여부를 판단한다.

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)	$\frac{l}{240}$

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. 2와 같이 폭이 1m인 보로 보고 계산하거나, 단변 방향의 경간을 사용하여 계산한다. 이 때, 긴장재의 배치형태를 나타낸 그림은 Fig. 3과 같다. 직선형

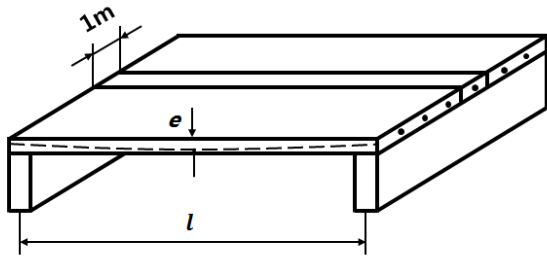
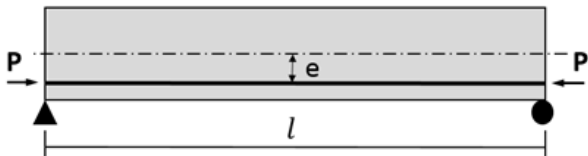
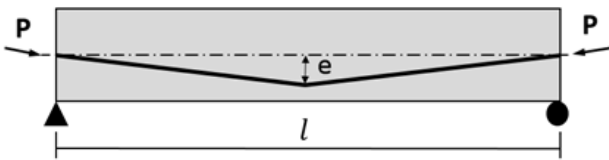


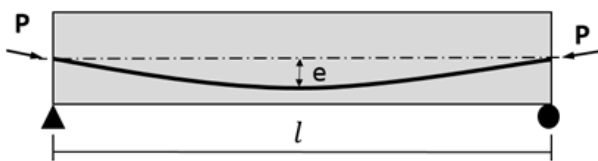
Fig. 2 Prestressed one-way slab



(a) Straight tendon



(b) Bending tendon



(c) Parabolic tendon

Fig. 3 Types of tendon profile

태 긴장재를 사용한 부재의 솟음을 구하는 식 (1), 절곡형태 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, P 는 긴장력, e 는 편심거리, l 은 스패ん길이를 의미하며, E 는 콘크리트 탄성계수, I 는 단면2차모멘트를 나타낸다.

비균열부재의 처짐은 균열이 일어나지 않은 콘크리트 전체 단면에 대한 단면2차모멘트와 규정된 콘크리트에 대한 탄성계수를 사용하여 구한다. 균열부재의 처짐을 구하는 방법은 유효단면2차모멘트를 이용하는 방법과 이단선형법(bilinear

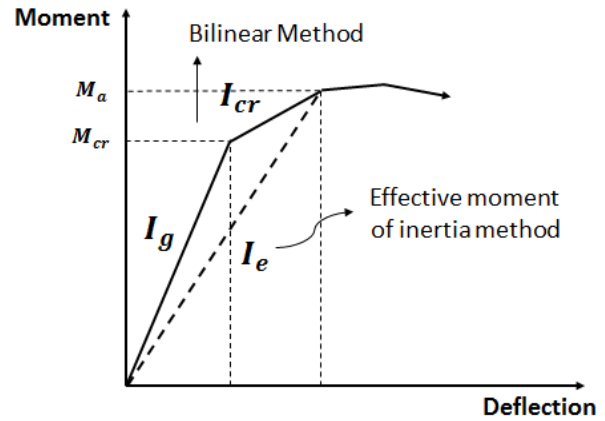


Fig. 4 Deflection calculations for cracked prestressed member

method)을 제시하고 있다. Fig. 4은 두 가지 방법을 비교하여 보여주는 그림이다.

균열이 발생할 경우에 균열면과 비균열면을 정확하게 구분하여 단면2차모멘트를 합하는 것은 어려우므로, 설계에서는 균열이 발생한 이후의 부재의 단면2차모멘트를 균열면에서의 단면2차모멘트와 비균열면에서의 단면2차모멘트의 평균값인 유효단면2차모멘트로 계산한다. 유효단면2차모멘트의 식 (4)은 다음과 같다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (4)$$

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = 1 - \frac{f_u - f_r}{f_t}$$

여기서, I_g 는 콘크리트 총 단면에 대한 단면2차모멘트, I_{cr} 은 균열환산단면에 대한 단면2차모멘트, f_r 은 콘크리트의 인장강도를 나타내며, f_u 는 부재에서 최종적으로 계산된 총 응력, f_t 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 균열단면2차모멘트는 정확한 계산 대신, 다음과 같은 식 (5)을 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 나타

내며, ρ_p 는 긴장재의 비($= A_{ps}/(b \cdot d_p)$)를 나타낸다.

3. 해석방법의 타당성 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 200,000MPa을 사용하였다. 프로그램을 사용한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 기존 연구자들의 프리스트레스트 콘크리트 일방향 부재의 실험결과와 해석결과를 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 등(2010)의 실험

Vu 등(2010)은 Fig. 5과 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 직선형태로 배치되었다. 콘크리트의 압축강도는 45MPa이며, 피복두께는 16mm이다. 긴장재에 가해진 프리스트레싱력은 54kN이다. 요소는 길이방향으로 20개를 모델링하였으며, 지점조건은 단순 지지로 모델링하였다.

본 연구는 사용하중 하에서의 프리스트레스트 콘크리트 슬래브의 처짐을 평가하는 것에 주안점을 두었기 때문에 사용

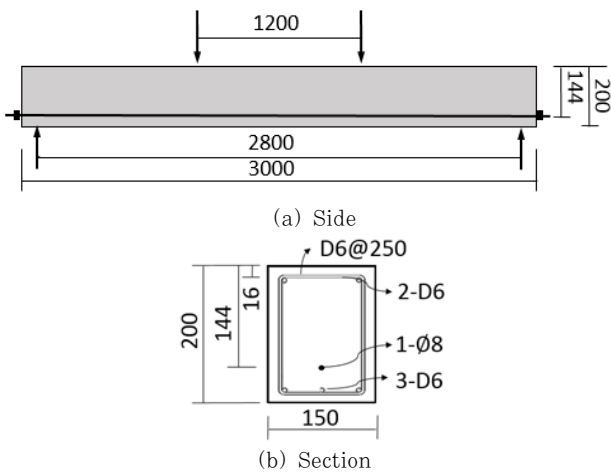


Fig. 5 Specimen configuration of Vu et al.(2010) experiment

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

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

하중 수준의 하중에 따른 처짐값을 비교하였다. 해석시, Beam No.1의 최대하중의 40% 수준인 약 15kN의 하중을 재하하였으며, 이 때 발생한 처짐값은 1.79mm이다. Table 3에 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타내었다. 해석결과와 실험결과의 비가 0.91로, 해석모델이 처짐을 다소 과소평가하는 것으로 나타났다. 이는 재료, 제작환경 등에 따라 강도가 달라지는 변동성이 큰 콘크리트의 특성에 기인한 것으로 판단되기 때문에 이를 고려했을 때, 90%정도의 예측은 비교적 정확한 결과라 사료된다.

3.2 Yang 등(2013)의 실험

Yang 등(2013)은 Fig. 6과 같이 상부의 집중하중을 받는 포스트텐션 콘크리트 일방향 슬래브의 휨 거동을 평가하였다. 시험체의 전체 길이는 3920mm이며 지점 중심간 길이는 3500mm이다. 또한 단면의 폭과 깊이는 각각 600mm와 125mm이다. 직경 10mm의 철근과 직경 6mm의 긴장재가 사용되었으며, 긴장재는 직선형태로 배치되었다. 콘크리트의 압축강도는 30MPa이며, 피복두께는 25mm이다. 긴장재에 가해진 프리스트레싱력은 162kN이다. 요소는 길이방향으로 20개를 모델링하였으며, 지점 조건은 단순지지로 모델링하였다.

사용하중 수준의 하중에 따른 처짐값을 비교하였으며, S-35의 최대하중의 40% 수준인 약 10.37kN의 하중을 재하하였으며, 이 때 발생한 처짐값은 4.09mm이다. 실험결과와 해석결과를 비교한 표를 보면, 해석결과와 실험결과의 오

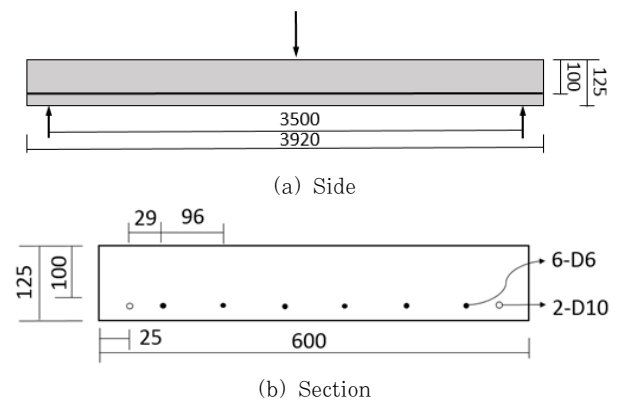


Fig. 6 Specimen configuration of Yang et al.(2013) experiment

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

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

차가 약 12%인 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 모델링 방법은 프리스트레스트 일방향 슬래브가 사용하중을 받을 때의 처짐을 비교적 유사하게 예측한다고 판단된다.

4. 변수 해석

본 논문에서는 프리스트레스트 일방향 슬래브의 해석 모델을 이용하여 처짐 산정 시 영향을 미치는 변수들에 대한 영향을 파악하고자 하였다. 유한요소해석 결과와 수계산 결과를 비교하기 위하여 앞서 설명한 수계산으로 솟음을 계산할 때 사용되는 변수로 주요 변수를 선정하였다. 고려된 변수들은 콘크리트 압축강도, 편심 거리, 활하중, 그리고 긴장재의 배치형태이다. 변수에 관한 내용은 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Variable table

Specimen	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>e</i> (mm)	Live load (kN/m)	Tendon Profile
F-1	600	150	3750	35	35	4	Straight
F-2	600	150	3750	40	35	4	Straight
F-3	600	150	3750	45	35	4	Straight
F-4	600	150	3750	50	35	4	Straight
E-1	600	150	3750	35	40	4	Straight
E-2	600	150	3750	35	45	4	Straight
E-3	600	150	3750	35	50	4	Straight
L-1	600	150	3750	35	35	2	Straight
L-2	600	150	3750	35	35	3	Straight
L-3	600	150	3750	35	35	5	Straight
P-1	600	150	3300	35	35	4	Straight
P-2	600	150	3300	35	35	4	Parabolic
P-3	600	150	3300	35	35	4	Bending

4.1 콘크리트 압축강도에 따른 처짐

프리스트레스트 콘크리트 부재는 철근콘크리트 부재에 비하여 고강도의 콘크리트를 주로 사용한다. 일반적으로 프리스트레스트 콘크리트 부재에서는 30MPa이상의 고강도 콘크리트가 사용되지만, 50~70MPa의 고강도 콘크리트 사용이 증가하는 추세에 따라 콘크리트 압축강도를 35MPa, 45MPa, 55MPa, 65MPa를 변수로 두어 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과는 앞서 검증한 유한요소해석 결과값과 수계산 결과값, 그리고 ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한

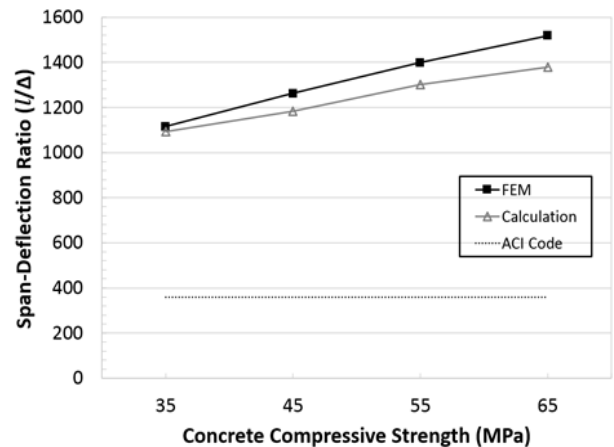


Fig. 7 Effects of concrete compressive strength

계값을 비교하였으며, Fig. 7과 같다.

콘크리트 압축강도에 따른 처짐의 양상을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 콘크리트 압축강도가 커질수록 처짐이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 유한요소해석 결과값과 수계산 결과값 모두 ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한계값보다 작은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 콘크리트 압축강도가 35MPa일 때 수계산 결과값은 3.43mm, 유한요소해석 결과값은 3.36mm이다. 따라서 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 0.98이며, 두 값이 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 콘크리트 압축강도가 커질수록 수계산 결과값과 유한요소해석 결과값은 차이를 보인다. 콘크리트 압축강도가 65MPa일 때 수계산 결과값은 2.72mm, 유한요소해석 결과값은 2.47mm이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 0.91이다. 이를 통해 콘크리트 압축강도가 커질수록 수계산이 유한요소해석에 비하여 처짐을 과대평가하고 있다는 것을 확인하였다.

4.2 편심 거리에 따른 처짐

프리스트레스트 콘크리트 부재에는 부재축과 편심 거리만큼 떨어져 작용하는 하중에 의해 발생하는 편심모멘트가 존재한다. 따라서 편심 거리에 따른 처짐의 양상을 확인하기 위해 직선으로 배치한 긴장재의 편심 거리를 35mm, 40mm, 45mm, 50mm을 변수로 두어 유한요소해석을 수행하였으며, 결과는 Fig. 8과 같다.

편심 거리에 따른 처짐의 양상을 Fig. 8에서 보면, 편심 거리가 커질수록 처짐이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 유한요소해석 결과값과 수계산 결과값 모두 ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한계값보다 작은 값을 나타내

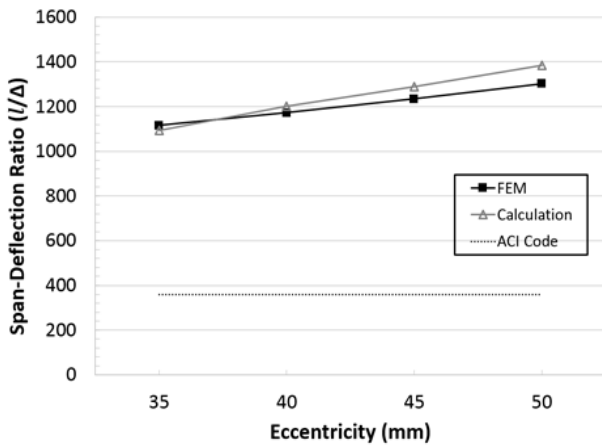


Fig. 8 Effects of eccentricity

는 것을 알 수 있다. 편심 거리가 35mm일 때 수계산 결과값은 3.43mm, 유한요소해석 결과값은 3.36이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 0.98이다. 또한 편심이 50mm 일 때 수계산 결과값은 2.71mm, 유한요소해석 결과값은 2.88mm이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 1.06이다. Fig. 8에서 보면, 편심이 증가할수록 유한요소해석 결과값이 감소하는 비율보다 수계산 결과값이 감소하는 비율이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 처짐에 기여하는 편심 거리의 영향이 수계산에서보다 유한요소해석에서 더 작다고 판단된다.

4.3 활하중에 따른 처짐

프리스트레스트 부재에 활하중이 증가하면 긴장재의 상향력과 부재의 하향력이 평형을 이루는 상태를 지나 처짐이 발생한다. 따라서 프리스트레스트 일방향 슬래브에 작용하는 활하중에 따른 처짐의 양상을 확인하기 위해 활하중을 2kN/m, 3kN/m, 4kN/m, 5kN/m를 변수로 두어 유한요소해석을 수

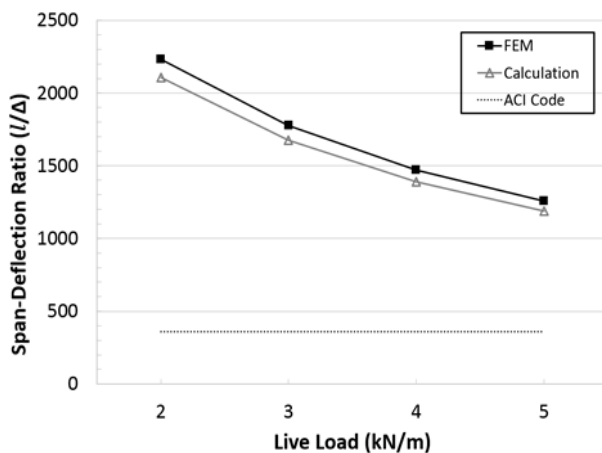


Fig. 9 Effects of live load

행하였으며, 결과는 Fig. 9와 같다.

활하중에 따른 처짐의 양상을 Fig. 9에서 보면, 활하중이 커질수록 처짐이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 유한요소해석 결과값과 수계산 결과값 모두 ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한계값보다 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 활하중이 2kN/m일 때 수계산 결과값은 1.78mm, 유한요소해석 결과값은 1.68이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 1.06이다. 또한 활하중이 5kN/m일 때 수계산 결과값은 3.16mm, 유한요소해석 결과값은 2.98mm이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 1.06이다. 이를 통해 활하중이 작용할 때 수계산이 유한요소해석보다 처짐을 과대평가하는 것을 확인하였다.

4.4 긴장재의 배치형태

프리스트레스트 부재에 사용되는 긴장재의 배치형태에 따라 부재의 중앙부와 단부에서 콘크리트 단면에 발생하는 응력은 변화한다. 따라서 프리스트레스트 일방향 슬래브에 사용되는 긴장재의 배치형태에 따른 처짐의 양상을 확인하기 위해 직선형태, 곡선형태, 그리고 절곡형태를 변수로 두어 유한요소해석을 수행하였으며, 결과는 Fig. 10과 같다.

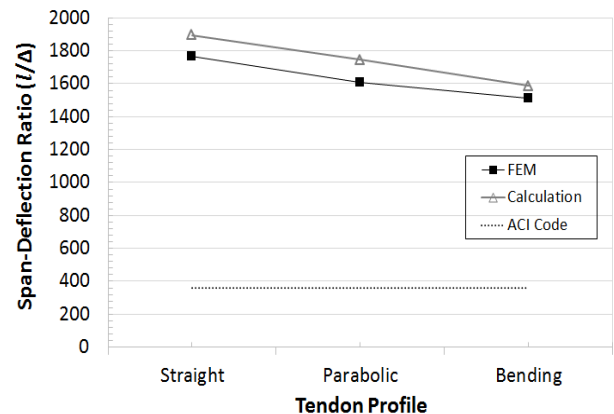


Fig. 10 Effects of tendon profile

Fig. 10에서 보는 바와 같이, 직선형태의 처짐이 가장 작은 값을 나타내었으며 절곡형태의 처짐이 가장 큰 값을 나타내었다. 또한 직선형태, 곡선형태, 절곡형태 모두 ACI Building Code에서 제시하고 있는 처짐 한계값보다 작은 값을 나타내었다. 직선형태일 때 수계산 결과값은 1.74mm, 유한요소해석 결과값은 1.87mm이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 1.07이다. 또한 곡선형태일 때 수계산 결과값은 1.89mm, 유한요소해석 결과값은 2.05mm이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 1.08이다. 마지막으로 절

곡형태일 때 수계산 결과값은 2.08mm이며, 유한요소해석 결과값은 2.18mm이며, 수계산 결과값 대 유한요소해석 결과값의 비는 1.05이다. 이를 통해 직선형태의 긴장재 배치가 처짐에 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한 절곡형태일 때, 유한요소해석과 수계산의 차이가 가장 적다는 것을 확인할 수 있으며, 모든 경우에서 수계산이 유한요소해석보다 처짐을 과소평가하는 것을 알 수 있다.

4.5 회귀분석

프리스트레스트 콘크리트 부재의 솟음을 구하는 식에서 고려되는 설계변수인 콘크리트 압축강도와 편심 거리의 영향을 분석하기 위해 회귀분석을 수행하였다. 유한요소해석으로 구한 솟음값을 SPSS으로 회귀분석하였으며, 이를 수계산으로 계산한 솟음값과 비교하였다. Table 6을 보면, 콘크리트 압축강도와 편심 거리를 제외한 변수를 정리하였을 때 수계산 결과로 얻은 식의 계수는 0.25이며, 유한요소해석 결과로 얻은 식의 계수는 0.184이다. Fig. 11을 보면, 수계산이 회귀분석 결과보다 솟음을 과대평가하고 있으며, $e/\sqrt{f'_c}$ 의 변화에 따른 솟음의 증가량이 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

Table 6 Result of regression analysis

	Hand Calculation	FEM
Correlation Equation	$y = 0.25 \times \frac{e}{\sqrt{f'_c}}$	$y = 0.184 \times \frac{e}{\sqrt{f'_c}}$

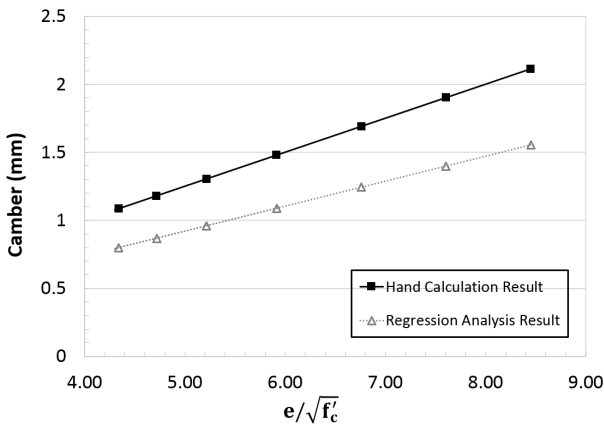


Fig. 11 Comparison of hand calculation result and regression analysis result

5. 결론

본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 사용성 평가를 위한 처짐을 분석하기 위하여 유한요소법에 기반한 해석적 연구를 수행하였다. 변수는 콘크리트 압축강

도, 편심 거리, 활하중, 그리고 긴장재의 배치형태를 선정하였다.

- (1) 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 처짐 예측을 위해 상용 유한요소 프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 유한요소해석 모델링의 검증은 위하여 기존 연구자들의 실험결과와 결과를 비교한 결과, 사용하중을 받을 때의 처짐을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.
- (2) 콘크리트 압축강도에 대한 변수 해석결과, 콘크리트 압축강도가 커질수록 처짐이 감소하며, 수계산이 유한요소해석에 비하여 처짐을 과대평가하고 있다는 것을 확인하였다. 편심 거리에 대한 변수 해석결과, 편심 거리가 커질수록 처짐이 감소하며, 처짐에 기여하는 편심 거리의 영향이 수계산에서보다 유한요소해석에서 더 작다고 판단되었다.
- (3) 활하중에 대한 변수해석 결과, 활하중이 커질수록 처짐이 증가하며, 활하중이 작용할 때 수계산이 유한요소해석보다 처짐을 과소평가하는 것을 확인하였다. 긴장재의 배치에 대한 변수해석 결과, 직선형태의 처짐이 가장 작은 값을 나타내었으며, 수계산이 유한요소해석보다 처짐을 과소평가하는 것을 알 수 있다.
- (4) 콘크리트 압축강도와 편심 거리가 프리스트레스트 일방향 슬래브의 솟음에 미치는 영향을 분석하기 위해 회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 수계산이 회귀분석 결과보다 솟음을 과대평가하고 있으며, $e/\sqrt{f'_c}$ 의 변화에 따른 솟음의 증가량이 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2013R1A2A2A01067754)입니다. 또한 (주)너른기술의 기술지원에 감사드립니다.

References

ACI Committee 318-11 (2011) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-11)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, p.503.

Lee, S.C., Lee, Y.H. (2011) Behavior of Post-Tensioned Two-Way Slabs Depending on Tendon Layout, *J.*

- Korean Soc. Hazard Mitig.*, 11(6), pp.53~59.
- Moon, J.K., Lee, L.H.** (1995) Analytical Method of Prestressed Concrete Members with Unbonded Tendons, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 8(4), pp.75~85.
- PCI Industry Handbook Committee** (1999) *PCI Design Handbook Precast and Prestressed Concrete Fifth Edition*, Precast/Prestressed Concrete Institute, U.S.A., p.632.
- Vu, N.A., Castel, A., Francois, R.** (2010) Response of Post-tensioned Concrete Beams with Unbonded Tendons Including Serviceability and Ultimate State, *Eng. Struct.*, 32(2), pp.556~569.
- Wu, X.H., Otani, S., Shiohara, H.** (2001) Tendon Model for Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures, *J. Struct. Eng.*, 127(4), pp.398~405.
- Yang, K.H., Mun, J.H., Kim, G.H.** (2013) Flexural Behavior of Post-tensioned Normal Lightweight Concrete One-way Slabs, *Eng. Struct.*, 56, pp.1295~1307.

요 지

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 일방향 슬래브의 사용성 평가를 위한 처짐을 분석하기 위하여 유한요소법에 기반한 해석적 연구를 수행하였다. 유한요소 상용 프로그램을 이용한 해석결과와 실험결과를 비교하여 모델링의 타당성을 검증하였으며, 비교적 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 콘크리트 압축강도, 편심 거리, 활하중, 그리고 긴장재의 배치형태에 따른 처짐을 분석하여 수계산 결과와 비교하였고, 회귀분석을 통해 변수들과 처짐 사이의 상관관계를 확인하였다. 그 결과, 콘크리트 압축강도가 클수록, 편심 거리가 클수록, 활하중이 작을수록 처짐이 감소하는 것을 확인하였으며, 직선형태의 처짐이 가장 작고 절곡형태의 처짐이 가장 큰 것을 확인하였다. 또한 회귀분석을 통해 콘크리트 압축강도와 편심 거리가 솟음값에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 프리스트레스트 일방향 슬래브, 처짐, 변수 해석, 사용성