



RC슬래브의 처짐제어를 위한 상향긴장식 부분PT공법의 적용

이득행¹⁾ · 김강수^{1)*} · 김상식²⁾ · 김용남³⁾ · 임주혁³⁾

¹⁾서울시립대학교 건축학부 ²⁾인하대학교 건축학부 ³⁾(주)삼성물산 건설부문

Applicability of Partial Post-Tension Method for Deflection Control of Reinforced Concrete Slabs

Deuck-Hang Lee,¹⁾ Kang-Su Kim,^{1)*} Sang-Sik Kim,²⁾ Yong-Nam Kim,³⁾ and Joo-Hyuk Lim³⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

³⁾Samsung Engineering and Construction, Housing Division, Seoul 137-857, Korea

ABSTRACT Recently, it is getting into a good situation for the flat-plate slab system to be applied. The flat-plate slab without beam, however, is often too weak to control deflection properly compared to other typical slab-beam structures, for which the post-tension method is generally regarded as one of best solutions. The post-tension (PT) method can effectively control deflection without increase of slab thickness. Despite this good advantage, however, the application of PT method has been very limited due to cost increase, technical problems, and lack of experiences. Therefore, in order to reduce difficulties on applying full PT method under the current domestic circumstances and to enhance constructability of PT system, this research proposed the partial PT method with top jacking anchorage applied in a part of span as need. For the top jacking anchorage system, the efficiency of deflection control shall be considered in detail because it can vary widely depending on the location of anchorage that can be placed anywhere as need, and tensile stresses induced at back of the anchorage zone also shall be examined. Therefore, in this study, analysis were performed on the efficiency of deflection control depending on the location of anchorage and on tensile stresses or forces using finite element method and strut and tie model in the proposed top jacking anchorage system. The proposed jacking system were also applied to the floor slabs at a construction site to investigate its applicability and the analysis results of slab behavior were compared to the measured values obtained from the PT slab constructed by the partial PT method. The result of this study indicates that the partial PT method can be very efficiently applied with little cost increase to control deflection and tensile stresses in the region as a need basis where problem exists.

Keywords : partial prestressed method, post-tension, top anchorage system, deflection control, tensile stress

1. 서 론

건축물의 형태 및 구조형식은 시대적, 사회적 요구 및 환경에 따라 변화되어 왔다. 특히, 국내 주거용건물의 경우, 최근의 사회적 요구를 반영한 주택관련 정책의 변화에 따라 구조형식에도 적지 않은 변화가 시작되고 있다. 층간소음분쟁이 사회문제화 됨에 따라 건설교통부 (현 국토해양부)는 2004년 4월부터 ‘공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준¹⁾’을 고시하였으며, 주요 사항으로 슬래브의 최소 두께를 대폭 높이는 내용을 포함하였다. 특히, 1등급에 해당하는 경우에, 슬래브의 최소두

께가 벽식 구조인 경우에는 210 mm인 반면, 무량판 구조는 180 mm 이상으로 규정하였다. 또한, 2006년 5월 개정된 건축법 시행령²⁾에서는 리모델링이 용이한 구조를 갖춘 공동주택에 대하여 용적률과 높이 제한을 최대 20% 까지 완화할 수 있도록 하였다. 여기서 리모델링이 용이한 구조란 내력벽의 길이가 일정비율 이하가 되는 것을 의미하는데, 무량판구조가 이에 포함된다. 이러한 제도적 변화는 기존의 벽식구조에 비하여 공사비면에서 불리하였던 기둥식 구조 (무량판구조)가 적용될 수 있는 발판이 되었으며, 향후에는 기존의 벽식구조와 대등한 수준으로 자리매김할 것으로 전망된다.

국내 주상복합 건물의 경우에는 이미 기둥식 구조시스템이 많이 적용되고 있다. 그러나 갈수록 장경간화 되어 가는 평면의 경향 때문에 슬래브의 처짐을 제어하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되고 있으며, 이러한 장경간

*Corresponding author E-mail : kangkim@uos.ac.kr

Received January 28, 2009, Revised April 10, 2009

Accepted April 17, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

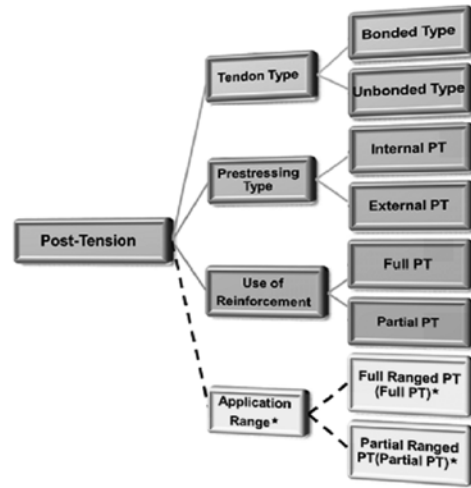
슬래브의 처짐 문제를 해결할 수 있는 효과적인 방법으로 포스트텐션 (post-tension, PT) 공법을 적용하는 것을 들 수 있다.³⁻⁸⁾ 하지만, 아직 국내에서는 PT공법을 적용한 사례가 매우 드문 것이 현실이며, 이것은 PT구조의 공사비가 해외에 비하여 비싸다는 점도 있지만 국내에 PT공법이 일반화 되지 않았기 때문에 PT공법의 효과에 대한 우려와 함께 공사비의 책정 및 현장관리의 어려움 등에 기인한 것도 많다. 이처럼 PT공법이 처짐제어에 매우 효율적임에도 불구하고 국내에서의 현실적인 문제 때문에 적용이 미비한 문제점이 있음을 인식하고, 이에 대한 대처방안으로 본 연구에서는 기존의 철근콘크리트 (reinforced concrete, RC)공법을 대체하는 공법으로서가 아니라 기존의 RC공법을 보완하는 방법으로 부분PT공법 (partial post-tension)의 도입을 검토하였다. 즉, RC구조에 PT구조를 추가하여 처짐을 제어하고, PT를 부분적으로만 도입함으로써 전구간 PT공법을 도입하는데 따른 부담을 최소화 하는 대안이 될 수 있다는 판단에 근거한 것이다.

RC공법의 보완으로써 부분PT공법을 적용하게 되면 처짐 억제제를 위하여 바닥판의 두께가 두꺼워지는 것을 피할 수 있으며, 동일한 층에서도 건물의 용도 및 경간 길이에 따라서 바닥판의 두께가 달라져서 발생할 수 있는 시공성 저하 및 공사비 증가에 대한 문제를 효과적으로 해결할 수 있게 된다. 또한, PT공법을 필요한 구간에만, 즉, 바닥판의 일부 구간에만 도입하여 긴장력의 도입이 비효율적인 구간에서는 이를 선택적으로 배제할 수 있으며, 국내에서 PT공법을 도입함에 따른 현실적인 제약조건에 의한 부작용을 최소화 할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 부분PT공법 적용에 의한 처짐 제어효과 및 효율성을 분석하고, 긴장 정착구 주위의 응력상태를 고찰함으로써 부분PT공법의 적용성을 면밀히 검토하고자 하였다. 또한 시공성의 개선을 위하여 상향긴장방식을 도입하고, 현장적용을 통하여 구조적, 시공적 측면에서 발생할 수 있는 문제점도 아울러 점검하고자 하였다.

2. 상향긴장방식을 적용한 부분PT구조의 개념

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 포스트텐션 구조는 일반적으로 긴장재의 부착 여부에 따라 부착방식과 비부착 방식, 긴장 방식에 따라 내부긴장방식과 외부긴장방식, 철근의 혼용 여부에 따라 완전PT (full PT)와 부분PT (partial PT)로 구분된다. 또한, PT적용 구간에 따라서는 전구간 PT와 부분구간 PT로 나눌 수 있다. 본 연구에서 의미하는 부분PT (partial PT)공법은 철근의 혼용 및 부분 구간 적용을 모두 포함하는 개념임을 유의해야 한다.

국내에서는 RC건축물의 시공시에 수직 거푸집 시스템을 사용하는 것이 일반적이는데, 슬래브의 단부에 긴장 정착구가 위치한 경우에는 수직 거푸집과의 간섭 및 작업 공간 확보의 어려움으로 인하여 긴장작업에 큰 걸림돌이 된다. 이러한 국내 여건 및 시공성을 고려하면 슬래브



*This nomenclature is used in this study

Fig. 1 Classification of post-tensioning methods

단부가 아닌 내부에서 긴장하는 방식을 택하는 것이 현실적으로 유리할 수 있다 (Fig. 2(a)).

긴장재를 슬래브 내부에서 긴장하는 방법에는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 내부측면 긴장방식과 상향 긴장방식이 있다. 내부 측면긴장방식은 슬래브에 오프닝 (block-out)을 형성하여 긴장 작업공간을 확보하고 긴장 정착구 후면에 발생할 수 있는 인장력을 배제할 수 있는 효과적인 방법이지만 긴장 후에 콘크리트의 재타설 작업이 필요하므로 긴 거푸집 존치기간이 필요하는 등 시공성 및 공기에서 불리할 수 있다. 반면에 Fig. 2(a) 및 (c)에 나타낸 상향긴장방식은 슬래브 상부면에 긴장작업을 위한 포켓폼 (pocket form)을 형성하여 콘크리트를 한꺼번에 타설하므로 시공성이 뛰어나다. 다만, 정착구 후면에

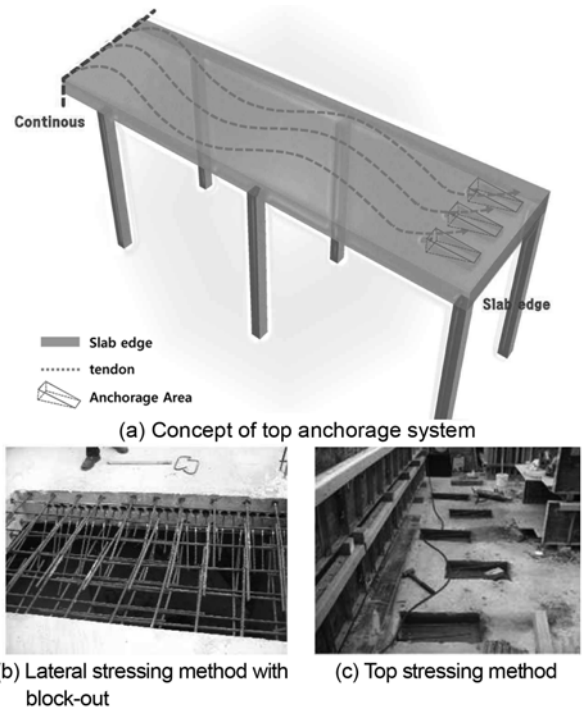


Fig. 2 Internal post-tensioning methods

긴장시 필요한 포켓폼 공간을 제외하고 콘크리트가 타설된 상태에서 긴장력을 도입하기 때문에, 정착구 후면 및 앞면의 콘크리트에 인장응력 및 압축응력이 국부적으로 집중되는 현상이 발생하게 되어 응력검토와 함께 추가적인 보강근에 대한 설계가 필요하다. 이 연구에서는 국내의 건설현장의 여건하에서 시공성이 유리하다고 판단되는 상향긴장방식을 적용하는 것을 전제로 하였다.

3. 처짐제어 효과

일반적으로 포스트텐션 긴장재는 모멘트의 형상에 따라 프로파일 (tendon profile)이 변화하게 배치된다. 상향긴장방식을 적용하면 양단 정착구에서 긴장재가 상부로 배치되어야 하므로 내부 측면긴장방식 등 다른 긴장방식을 적용한 경우와는 다른 양상으로 프로파일의 변화가 나타나게 되며, 부분구간에만 긴장재가 배치되는 부분PT 구조의 경우에는 전체 구간에 긴장재가 배치되는 경우와는 다른 치울림 (camber)효과가 발생하게 된다. 특히, 대부분 부정정구조인 건축물의 경우에는 2차모멘트 (secondary moment effect) 등의 부수적인 효과에 대한 고려가 필요하다. 따라서 상향긴장식 부분PT공법을 적용하여 단순지지, 양단 고정된 경우 및 기둥의 강성에 따라 변화되는 일반적인 단부조건을 가진 경우에 대하여 처짐 산정방법을 제시하고 처짐 제어 효과를 분석하였다.

3.1 단순지지된 부분PT구조의 처짐

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 단순지지된 휨부재에 상향긴장방식을 적용하여 일정 구간에만 긴장재를 배치한 경우에 대하여 살펴본다. 여기서, 부재의 길이를 l , 긴장재가 배치되지 않은 길이, 즉, 단부로부터 정착구까지의 거리를 a , 단부 긴장력을 P_V 로 나타내었다. 긴장재의 프로파일을 2차 곡선으로 가정하면

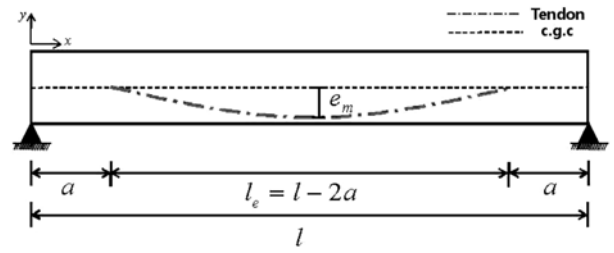
$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 x, y 는 각각 정착구로부터 긴장재의 수평 거리와 수직 거리이며, a_0, a_1 및 a_2 는 상수이다. 양단 정착구 ($x=0$)에서 $y=0$ 이고, 경간의 중앙부 ($x=l/2$)에서 $y=e_m$ 으로 나타내어, 이를 대입하여 정리하면 식 (1)은

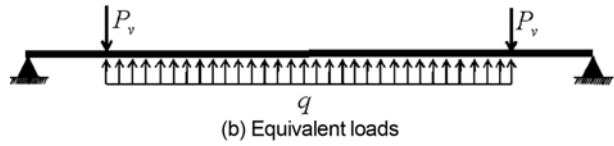
$$y = \frac{4e_m}{l_e^2}(l_e x - x^2) \quad (2)$$

로 표현된다.

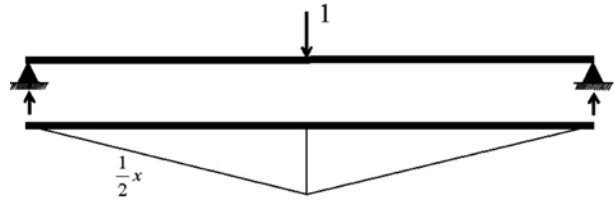
Fig. 3(a)와 같이 부분 구간에 PT가 적용된 부재에 긴장재에 의한 하중상태는 Fig. 3(b)와 같은 등가하중 (equivalent load)⁹⁾으로 치환하여 나타낼 수 있다. 따라서, 부재의 휨모멘트는



(a) Simply supported member with no eccentricity at anchorage



(b) Equivalent loads



(c) Moment diagram by unit-load method

Fig. 3 Partial PT system in a simply supported member with no tendon eccentricity at anchorage

$$M_x = q \frac{(x-a)^2}{2} - P_V(x-a) \quad (3)$$

가 되며, $P_V = q(\frac{l}{2} - a)$ 이므로, 식 (3)은

$$M_x = -\frac{q}{2}(x-a)(l-a-x) \quad (4)$$

로 표현될 수 있다. 한편, Fig. 3(c)와 같이 중앙부에 단위 하중을 작용시켰을 때의 모멘트(\bar{M})는 다음과 같다.

$$\bar{M} = \frac{x}{2} \left(0 \leq x \leq \frac{l}{2} \right) \quad (5)$$

식 (4) 및 (5)에서 구한 모멘트를 사용하여 단위하중법 (unit-load method)을 적용하면 긴장재의 상향력에 의한 치울림 (camber)을 계산할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \Delta &= 2 \int_a^{\frac{l}{2}} \frac{M\bar{M}}{EI} dx \\ &= -\frac{q}{EI} \int_a^{\frac{l}{2}} (-x^2 + lx - al + a^2) \left(\frac{x}{2} \right) dx \\ &= -\frac{q}{2EI} \left[-\frac{x^4}{4} + \frac{lx^3}{3} - \frac{alx^2}{2} + \frac{a^2x^2}{2} \right]_a^{\frac{l}{2}} \\ &= -\frac{q}{384EI} (5l^4 - 24al^3 + 24a^2l^2 + 32a^3l - 48a^4) \\ &= -\frac{5Pe_m l^2}{48EI} f(a)_{ss} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $f_{(a)_{ss}}$ 는 단순지지된 경우의 정착구 위치계수로 정의될 수 있으며,

$$f_{(a)_{ss}} = \frac{1}{[1-2(a/l)]^2} \left[1.0 - 4.8\left(\frac{a}{l}\right) + 4.8\left(\frac{a}{l}\right)^2 + 6.4\left(\frac{a}{l}\right)^3 - 9.6\left(\frac{a}{l}\right)^4 \right] \quad (7)$$

이다. $f_{(a)_{ss}}$ 에 따라 치올림량이 결정되며, 이는 전구간 PT를 적용할 경우에 대하여 부분 구간에만 PT를 적용할 때 텐던의 배치구간 길이에 따른 상대적인 처짐제어 효율을 나타내는 것이다. 즉, $f_{(a)_{ss}}$ 값은 전구간에 텐던을 배치하는 경우 ($a/l=0$)에는 1이 되며, 텐던을 배치하지 않은 경우 ($a/l=1$)에는 0이 되어 치올림이 생기지 않는 것을 의미한다. 식 (7)을 이용하여 정착구 위치계수 ($f_{(a)_{ss}}$)에 따른 효율을 표로 정리하면 Table 1과 같다. 예를 들면, $l=10$ m, $a=1$ m이면 처짐제어 효율은 전구간에 PT를 적용한 경우에 비하여 약 88%의 치올림량이 생기게 된다.

Fig. 3에 나타난 긴장재의 배치는 긴장재의 양단부가 단면의 도심에 위치한 경우인데 반해, 일반적으로는 단부에서 긴장재가 편심을 가지게 되므로 단면력 및 처짐이 위의 경우와는 다르게 나타난다. 즉, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 정착구 위치에 편심 (e)으로 인한 모멘트가 발생하게 되며, 이를 정리하면

$$M_x = P \times e + q \frac{(x-a)^2}{2} - P_V(x-a) \quad (8)$$

로 구해진다. 여기서 $P_V = q\left(\frac{l}{2}-a\right)$ 이므로 식 (8)은

$$M_x = P \times e - \frac{q}{2}(x-a)(l-a-x) \quad (9)$$

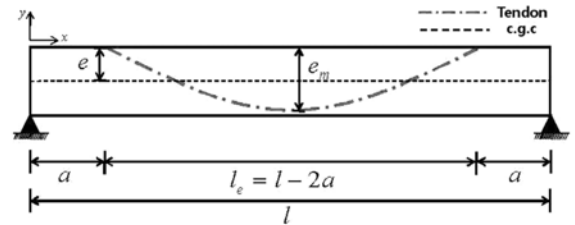
가 된다. 식 (9)를 이용하여 중앙부의 치올림을 계산하면

$$\Delta = 2 \int_a^{\frac{l}{2}} \frac{M \bar{M}}{EI} dx = -\frac{P}{48EI} f(a)_{se} \quad (10)$$

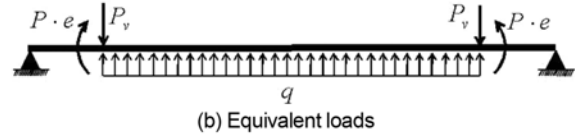
Table 1 Efficiency of deflection control by tendon lengths for simply supported members with no tendon eccentricity at anchorage

a (m) \ l (m)	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
6	0.82	0.81	0.80	0.78	0.77	0.76
7	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80
8	0.87	0.86	0.86	0.85	0.84	0.83
9	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86	0.85
10	0.90	0.89	0.89	0.88	0.87	0.87

*Note : as the efficiency of deflection control is only for simply supported members, these numbers shall not be compared to those for other support conditions. For such a comparison, the calculated deflections shall be used.



(a) Simply supported member with an eccentricity at anchorage



(b) Equivalent loads

Fig. 4 Partial PT system in a simply supported member with an tendon eccentricity at anchorage

으로 정리되고, $f(a)_{se}$ 는 긴장재의 프로파일이 고려된 정착구 위치계수를 나타내며,

$$f(a)_{se} = [6e(l^2 - 2a^2) + \frac{e_m}{l_e^2}(5l^4 - 24al^3 + 24a^2l^2 + 32a^3l - 48a^4)] \quad (11)$$

이다. 따라서 처짐제어 효율은 정착구 위치계수인 식 (11)에 따라 변화되며, Table 2와 같이 정리된다.

3.2 양단고정 상향긴장방식의 처짐제어 효과

Fig. 5와 같이 양 단부가 고정인 경우에 휨모멘트는

$$M_x = M_{fixed} + Pe + \frac{q}{2}(x-a)^2 - P_V(x-a) \quad (12)$$

이며, 여기서, M_{fixed} 는 단부의 반력인 2차모멘트, $P_V = q\left(\frac{l}{2}-a\right)$ 이다. 따라서, 식 (12)는

$$M_x = M_{fixed} + Pe - \frac{q}{2}(x-a)(l-a-x) \quad (13)$$

으로 정리된다. 식 (13)에 카스티리아그노의 정리¹⁰⁾를 적용하여 M_{fixed} 를 구할 수 있으며,

Table 2 Efficiency of deflection control by tendon lengths for simply supported members with an tendon eccentricity at anchorage

a (m) \ l (m)	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
6	0.68	0.66	0.63	0.61	0.59	0.57
7	0.73	0.71	0.69	0.67	0.66	0.64
8	0.76	0.75	0.74	0.72	0.71	0.69
9	0.79	0.78	0.77	0.76	0.74	0.73
10	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76

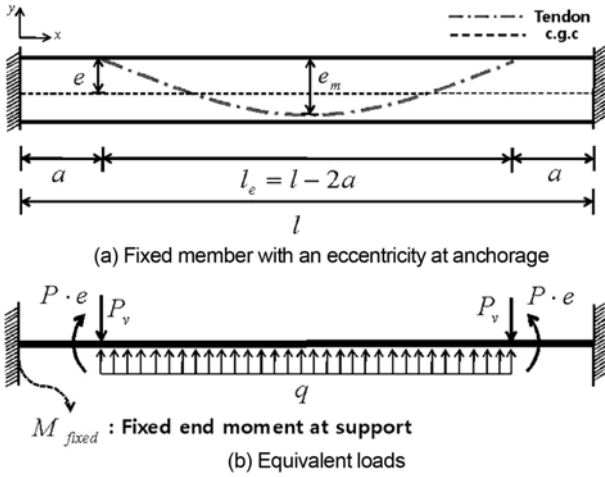


Fig. 5 Partial PT system in a member fixed at both ends

$$M_{fixed} = \left[-Pe\left(\frac{l}{2}-a\right) + \frac{P_v(l^2-a^2)}{2} - P_v a \left(\frac{l}{2} - q \left(\frac{l^3}{48} - \frac{al^2}{8} + \frac{a^2l}{4} - \frac{a^3}{6} \right) \right) \right] \times \frac{2}{l} \quad (14)$$

으로 정리된다.

식 (12)~(14) 및 모멘트 면적법을 적용하면, 중앙부에서의 처짐은

$$\Delta = \frac{5P_e}{12EI_s} f_{(a)fixed} - \frac{M_{fixed}l^2}{8EI} \quad (15)$$

으로 산정되며, $f_{(a)fixed}$ 는 양단고정인 경우의 정착구 위치계수로서 다음과 같다.

$$f_{(a),fixed} = \left(\frac{l^2}{4} - \frac{4al}{5} + \frac{3a^2}{5} \right) \times \left[-e + \frac{4e_m}{l_e} \left(\frac{l}{2} - a \right) + \frac{4e_m}{l_e^2} \left(\frac{l}{2} - a \right)^2 \right] \quad (16)$$

Table 3은 식 (16)의 정착구 위치계수에 따른 양단고정 부재의 처짐제어 효율을 나타낸 것이다.

3.3 기둥의 강성변화에 따른 처짐제어효과

3.3.1 중간층의 처짐제어 효과

실제 구조물에서는 단순지지나 양단고정과 같은 이상적인 단부조건이 아니기 때문에, 기둥, 보, 슬래브 및 벽체 등과의 상대적인 휨강성의 영향에 의하여 휨모멘트의 분포와 처짐 효율이 달라진다. Fig. 6(a)는 일반 구조물의 중간층을 간략화하여 나타낸 것이며, 이 구조물에서 기둥의 강성 (k_c)에 대한 슬래브 강성 (k_s)의 강성도비 (k_s/k_c)는

$$\frac{k_s}{k_c} = \frac{I_s l_c}{I_c l_s} \quad (17)$$

Table 3 Efficiency of deflection control by tendon lengths for fixed members

a (m) \ l (m)	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
6	0.69	0.66	0.62	0.59	0.56	0.53
7	0.78	0.75	0.72	0.69	0.66	0.63
8	0.85	0.82	0.80	0.77	0.74	0.71
9	0.91	0.88	0.86	0.83	0.80	0.78
10	0.96	0.93	0.91	0.88	0.86	0.84

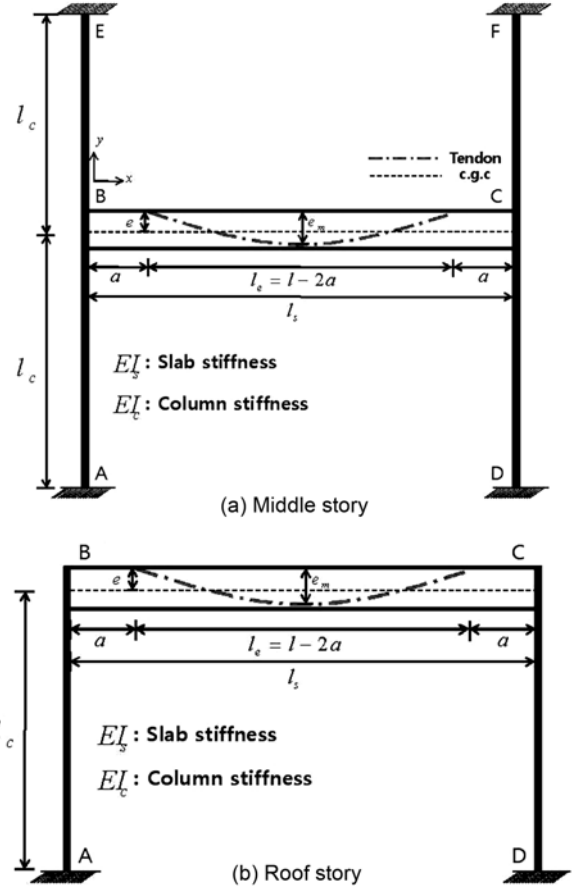


Fig. 6 Partial PT system in middle and roof story of typical structures

가 된다. 절점 B에서의 휨모멘트는

$$M_B = \frac{4I_c l_s \times M_{fixed}}{4I_c l_s + I_s l_c} \quad (18)$$

이 된다. 여기서 M_{fixed} 는 절점 B에서 고정단모멘트로 양단고정 부재의 단부 2차모멘트와 같은 크기이다. 따라서 3.2절의 계산방법과 동일한 방식으로 모멘트 면적법을 도입하여 처짐을 산정하면

$$\Delta = \frac{5P_e}{12EI_s} f_{(a)fm} - \frac{M_B l^2}{8EI} \quad (19)$$

으로 구해진다. 여기서, $f_{(a)fm}$ 은 중간층의 정착구 위치 계수로서

$$f_{(a)fm} = \left(\frac{l^2}{4} - \frac{4al}{5} + \frac{3a^2}{5} \right) \times \left[-e + \frac{4e_m}{l_e} \left(\frac{l}{2} - a \right) + \frac{4e_m}{l_e^2} \left(\frac{l}{2} - a \right)^2 \right] \quad (20)$$

이다. 정착구 위치계수에 따른 중간층 슬래브의 치솟음 효율은 Table 4에 정리하여 나타내었다.

3.3.2 지붕층의 처짐제어 효과

Fig. 6(b)는 일반 구조물의 지붕층을 간략화하여 나타낸 것이며, 기둥의 강성 (k_c)에 대한 슬래브 강성 (k_s)의 강성도비 (k_s/k_c)를 이용하여 절점B에서의 휨모멘트를 산정하면

$$M_B = \frac{2I_c I_s \times M_{fixed}}{2I_c I_s + I_s I_c} \quad (21)$$

이며, 슬래브 중앙에서 치울림은

$$\Delta = \frac{5P_e}{12EI_c} f_{(a)fr} - \frac{M_B l^2}{8EI} \quad (22)$$

으로 구해진다. 여기서, $f_{(a)fr}$ 는 지붕층의 정착구 위치계수를 나타내며,

$$f_{(a)fr} = \left(\frac{l^2}{4} - \frac{4al}{5} + \frac{3a^2}{5} \right) \times \left[-e + \frac{4e_m}{l_e} \left(\frac{l}{2} - a \right) + \frac{4e_m}{l_e^2} \left(\frac{l}{2} - a \right)^2 \right] \quad (23)$$

이다. 정착구 위치계수에 따른 지붕층 슬래브의 치솟음 효율은 Table 5에 나타난 바와 같다. 정착구 후면에서 지지점까지의 거리, 즉, 긴장재 미배치 구간 (a)이 길어질수록 처짐 제어효율은 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 식 (19) 및 식 (23)에서 나타내는 바와 같이 지지단의 강성이 클수록 치울림량이 작아지는 경향을 알 수 있다. 같은 이유로 인하여 3.2절에서 언급된 고정지지된 경우에 비해 3.1절에서 설명된 단순지지된 경우가 절대적인 치솟음량이 크게 발생한다. 따라서, 본 논문의 3.1~3.3절에서 설

Table 4 Efficiency of deflection control by tendon lengths for middle story of typical structures

a (m) \ l (m)	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
6	0.67	0.64	0.61	0.58	0.55	0.52
7	0.75	0.72	0.70	0.67	0.64	0.62
8	0.82	0.79	0.76	0.74	0.71	0.69
9	0.87	0.85	0.82	0.80	0.78	0.75
10	0.92	0.90	0.87	0.85	0.83	0.81

Table 5 Efficiency of deflection control by tendon lengths for roof story of typical structures

a (m) \ l (m)	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1
6	0.63	0.60	0.57	0.55	0.52	0.50
7	0.70	0.68	0.65	0.63	0.60	0.58
8	0.76	0.74	0.71	0.69	0.67	0.65
9	0.81	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71
10	0.89	0.87	0.85	0.83	0.80	0.78

명된 방법으로 전구간 PT를 적용한 경우에 대한 상대적인 개념으로 상향긴장을 적용한 부분PT부재의 처짐제어 효율을 나타냄으로써 이를 정량적으로 예측할 수 있음을 주목할 필요가 있다.

4. 정착구 후면의 인장력

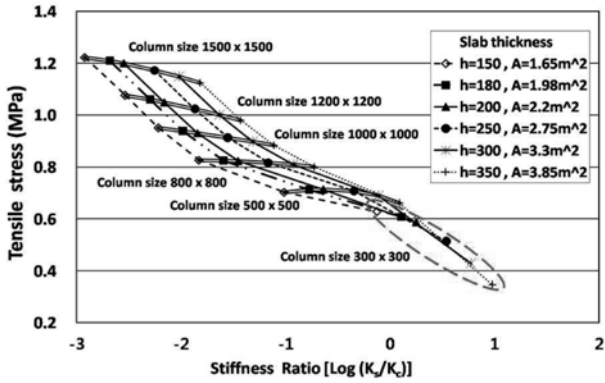
상향긴장방식의 적용시 가장 주의해야 할 사항은 정착구 후면에 발생하는 인장력의 제어이다. 따라서, 여기서는 유한요소해석 프로그램을 이용하여 슬래브와 기둥의 강성변화에 따른 정착구 후면의 인장응력을 분석하여 제시함으로써 부분PT공법의 초기설계단계에서 인장력을 용이하게 추정하는데 사용될 수 있도록 하였다. 또한, 스트럿-타이 모델 (strut-tie model, STM)을 적용하여 정착구 후면의 인장력 및 인장철근량을 산정하고, 정착구 주변에 대한 보다 상세한 유한요소해석을 통하여 국부응력에 대한 검토도 더불어 수행하였다.

4.1 기둥강성 변화에 따른 정착구 후면의 인장응력

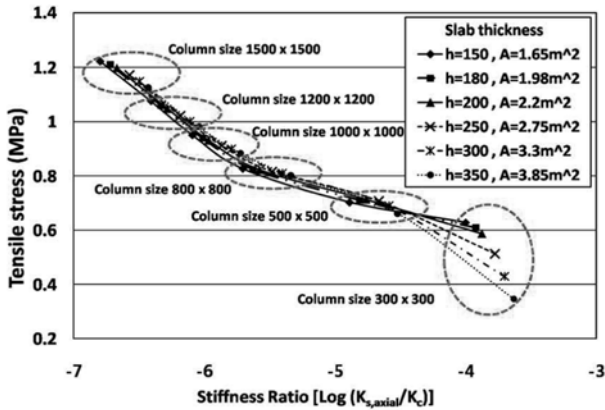
Figs. 7과 8은 플랫폼라이프 형식의 주거용 건물을 대상으로 하여 슬래브의 경우 경간길이 10m, 두께 150~300mm 범위이고, 기둥은 길이가 3.6m이고, 단면크기는 $300 \times 300 \text{ mm}^2 \sim 1,500 \times 1,500 \text{ mm}^2$ 의 범위 내에서 정착구 후면의 인장응력을 일반적으로 설계에 자주 사용되는 평균선압축력인 1 및 1.5 MPa인 경우에 대하여 각각 나타낸 것이다. 즉, Figs. 7과 8을 이용하여 상향긴장식 부분PT공법을 적용할 때 슬래브와 기둥의 단면크기 변화 및 로그휨강성비 ($\text{Log}(k_s/k_c)$) 또는 슬래브의 축강성에 대한 기둥의 휨강성의 로그비 ($\text{Log}(k_{s,axial}/k_c)$)에 따라 긴장력 도입시에 발생하는 정착구 후면의 인장응력을 용이하게 산정할 수 있다.

Fig. 7에 나타난 평균선압축응력 1 MPa인 경우에는 모두 정착구 후면에 발생하는 인장응력이 1.2 MPa 이하로써 기준에서 제시하는 긴장력의 손실 전 허용인장응력인 $0.25\sqrt{f_{ck}} = 1.36 \text{ MPa}$ 을 넘지 않는 수준임을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 평균선압축응력 1.5 MPa인 경우에도 정착구 후면에 발생하는 최대 인장응력이 1.8 MPa 수준이며, 기둥단면의 크기가 약 1.2m 이상인 약간의 경우를 제외하면 대부분 허용 인장응력의 범위를 만족했다. Fig. 7 (b)와 Fig. 8 (b)를 보면 슬래브 두께가 다른 경우에도 인

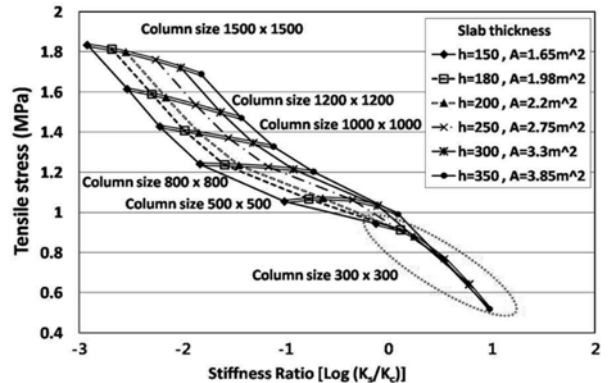


(a) Tensile stress vs. flexural stiffness ratio, $\text{Log}(k_s/k_c)$

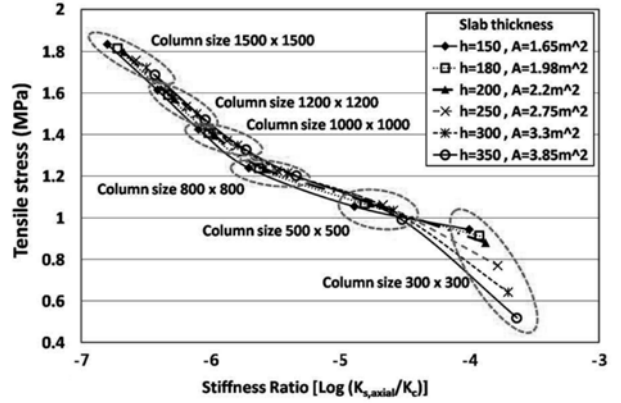


(b) Tensile stress vs. stiffness ratio, $\text{Log}(k_{s,axial}/k_c)$

Fig. 7 Tensile stress behind anchorage at average prestressing stress of 1 MPa



(a) Tensile stress vs. flexural stiffness ratio, $\text{Log}(k_s/k_c)$



(b) Tensile stress vs. stiffness ratio, $\text{Log}(k_{s,axial}/k_c)$

Fig. 8 Tensile stress behind anchorage at average prestressing stress of 1.5 MPa

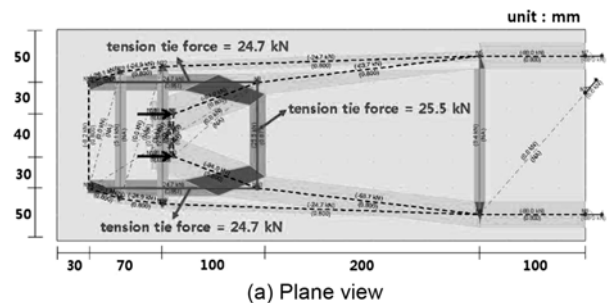
장응력 그래프가 일치하게 나타나는데, 이는 슬래브 축강성 ($E_{cs}A_{cs}/I_s$)에 대한 기둥의 휨강성 ($4E_cI_c/l_c$)비율 ($k_{s,axial}/k_c$)이 발생하는 인장응력을 결정하는 가장 중요한 인자임을 의미한다. 즉, 슬래브 두께보다 슬래브의 축강성에 대한 단부의 회전강성의 비 ($k_{s,axial}/k_c$)가 정착구 후면에 발생하는 인장력에 더욱 직접적인 영향을 끼치며, 슬래브 단면의 축강성이 작을수록, 단부의 회전강성이 클수록 인장력이 크게 발생하게 된다. 상향긴장방식이 적용된 부분 PT공법적용시 정착구 후면의 인장응력은 허용응력을 만족하는 경우가 대부분이며, 허용응력을 초과하는 경우에도 인장강도 및 균열응력이하 이므로 적절한 철근의 배근을 통하여 균열을 제어할 수 있는 수준임을 알 수 있다.

4.2 스트럿-타이 모델을 적용한 해석

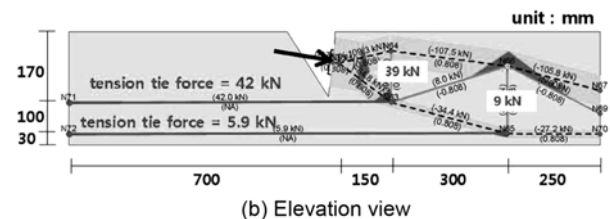
STM 해석은 프로그램 CAST¹¹⁾를 사용하였으며, Fig. 9 (a)와 (b)는 각각 해석에 사용된 스트럿과 타이의 평면과 입면을 보여준다. 해석시 긴장력은 최대허용 긴장력인 긴장재 인장강도 (f_{pu})의 80%에 해당하는 응력에 안정성을 고려하여 하중계수 1.2를 곱한 값을 사용하였다. 즉, 사용된 긴장력 (P_{pu})은

$$P_{pu} = 1.2 \times 0.8 \times f_{pu} \times A_{ps} \quad (24)$$

이며, 여기서, A_{ps} 는 긴장재의 단면적이다. Fig. 9 (a)의



(a) Plane view



(b) Elevation view

Fig. 9 Strut and tie model analysis

결과를 보면 긴장력에 의해서 상향긴장 정착구 후면에 발생하는 인장력 (T)은

$$T = 24.7 \times 2 = 49.4 \text{ kN} \quad (25)$$

으로 나타나며, 이는 Fig. 9 (b)에 나타난 입면 해석에서 구한 인장력 (T)인

$$T = 42.0 + 5.9 = 47.9 \text{ kN} \quad (26)$$

과 거의 일치한다. 즉, 평면과 입면 방향에 대한 해석을 통하여 3차원 (3D) 해석과 동일한 효과를 가질 수 있도록 해석을 수행한 것이다.

따라서, 49.4 kN의 인장력을 제어할 수 있는 적절한 철근배근이 필요하며, 이는 상향긴장 정착구 부근의 슬래브 상하부에 각각 2개의 D13과 2개의 D16철근이면 충분하다. 참고로, 구조설계기준^{12,13)}에서는 정착장치가 부재의 끝단으로부터 떨어진 경우에 적어도 긴장력의 35% ($0.35P_{pu}$) 이상의 힘을 부착철근이 전달할 수 있어야 한다고 제시하고 있다. 즉,

$$T = 0.35P_{pu} = 0.35 \times 1.2 \times 0.8 \times 1,860 \times 98.71 = 61.7 \text{ kN} \quad (27)$$

인 인장력이 정착구 후면에 발생하는 것으로 간주하여 이에 대한 철근배근을 하도록 규정하고 있다. 따라서, 기준에서 제시된 식 (27)에 의하여 산정된 인장력이 STM 해석에 의한 인장력보다 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 상향긴장 정착구를 사용한 경우에도 기준에 규정된 정착구 주변의 인장제어 철근량을 배근하면 긴장으로 인한 인장력을 제어하는 데에 충분하다는 것을 확인 할 수 있다.

4.3 정착구 주변의 FEM해석

4.1과 4.2에서 정착구 주변의 응력을 검토하였지만, 상향긴장방식에서 긴장을 위해서 반드시 필요한 상향 반개구부 (opening)의 주위에 발생할 수 있는 국부응력에 대해서는 보다 상세한 응력 검토가 이루어져야만 하기 때문에 정착구 주변의 국부적인 응력검토를 위하여 정밀 유한요소해석을 수행하였다. 해석모델에서는 슬래브 판의 경계조건이 정착구 주변의 국부응력에 미치는 영향을 최소화 할 수 있도록 하기 위하여 판의 크기를 8m로 크게하고 정착구 주변에서는 메쉬를 매우 작게 나누어 적용하였다. 콘크리트의 설계강도 (f_{ck})는 35 MPa, 긴장력 도입시 강도 (f_{ci})는 28 MPa를 전제 하였으며, 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10(a)는 정착구 1개를 배치한 경우로서, 정착구 후면에서 발생하는 인장응력은 대략 0.4~2.0 MPa 범위로 균열응력인 $0.50\sqrt{f_{ci}} = 2.65 \text{ MPa}$ 이하이다. 압축응력은 최대 6.0 MPa 정도로 허용 압축응력인 $0.6f_{ci} = 17.0 \text{ MPa}$ 에 비해 매우 낮은 수준이다. Fig. 10(b)에 보이는 2개의 정착구를 배치한 경우에는 1개의 정착구를 배치한 경우보다 더 큰 인장응력이 발생하였으며, 정착구 하부에서 가장 큰 인장응력이 발생되었다. 매우 국소적인 부분에 발생하는 응력집중현상을 제외하면 국부응력은 대략 0.8~3.5 MPa 범위의 분포를 보였으며, 1개의 긴장재를 배치한 경우와는 다르게 인장응력의 크기가 콘크리트의 인장강도 및 균열응력을 넘는 것을 알 수 있다. 따라서 정착구를 2개 배치했을 때에는 설계 시, 긴장 직후의 응력검토

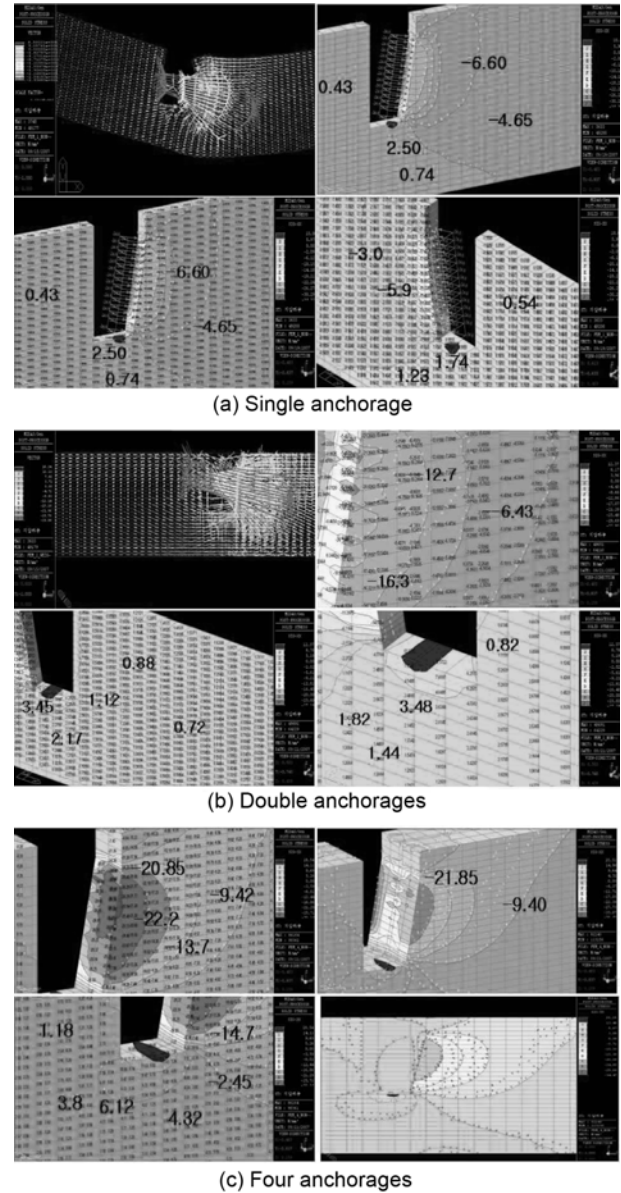


Fig. 10 Local stress by anchorage at average prestressing stress of 1.5 MPa

를 반드시 실시해야 하며, 4.2에서 언급된 바와 같이 추가적인 부착철근을 배근하여 균열과 인장응력을 제어해야 한다. Fig. 10(c)에서 보이는 바와 같이 정착구에 긴장재를 4개 배치한 경우에는 앞서 언급된 1개 또는 2개의 긴장재가 배치된 경우와는 달리 정착구를 통하여 전달되는 압축응력이 f_{ci} 를 국부적으로 초과하는 수준까지 발생하는 것으로 나타나서 f_{ci} 를 높이고 정착판의 면적을 늘리는 등의 조치와 함께 지압 및 압축응력에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 함을 알 수 있다. 인장응력의 경우에는 국소적인 응력집중현상 부분을 제외하더라도 1~6 MPa 정도의 분포를 보였으며, 이 역시 콘크리트의 인장강도를 넘는 값이므로 추가적인 부착철근의 배근이 요구된다.

4.1~4.3의 분석을 토대로 하고 파열력 및 활렬력 등을 추가적으로 검토하여¹⁴⁾ 2개의 텐던 정착구를 본 연구에

서 제안하는 상향긴장방식으로 설계하면 Fig. 11과 같은 정착구 주변의 배근상세를 얻을 수 있다. 상향긴장방식이기 때문에 정착구 부근에서 텐던은 상부로 기울어져 배치되며, 정착구 후면에는 긴장을 위한 반개구부가 있고 정착구 주변의 슬래브 상하부에는 각각 2개의 D13과 2개의 D16철근을 배근하였다.

5. 부분PT를 적용한 슬래브의 처짐제어 분석

상향긴장식 부분PT구조를 적용하면 기존 포스트텐션 방식과 달리 정착구가 슬래브 단부에 있지 않고 정착구의 위치가 슬래브 내부의 다양한 위치에 있을 수 있기 때문에 휨모멘트, 처짐 및 정착구 후면의 응력분포가 앞서 살펴본 바와 같이 다양하게 변화되며, 부분적인 구간에 PT를 적용하기 때문에 전체 슬래브 시스템의 거동이 기존 슬래브와는 다르게 된다. 여기서는 Fig. 12(a)에 보이는 바와 같은 전형적인 주거용 건물의 평면을 대상으로 중앙부 슬래브를 각각 RC, 전구간 PT 및 상향긴장식 부분PT를 적용하여 처짐을 비교 분석하였다. 유한요소해석은 포스트텐션 슬래브의 해석에 잘 알려진 ADAPT¹⁵⁾ 프로그램을 사용하였으며, 사용하중상태에 대하여 검토하였다. 전구간 PT 및 상향긴장식 부분PT를 적용한 경우에는 여러 가지 형태의 배치를 검토한 후에 Fig. 12(a)에 보이는 바와 같이 처짐제어에 가장 효율적인 배치로 나타난 단부 집중방식을 하여 적용하였다. Fig. 12(b)~(d)에 보이는 바와 같이 상향긴장식 부분PT를 적용한 경우에 RC슬래브에 비하여 약 30%정도 처짐이 작게 나타났으며, 전구간 PT의 경우와도 거의 유사한 처짐제어 성능을 보였다. 이는 전구간 PT에 비하여 절반정도만의 긴장재량으로 처짐이 크게 발생하는 구간에 부분적으로만 PT를 적용하여 처짐제어 성능을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 의미하며, 이는 긴장재량의 절감으로부터 공사비를 낮출 수 있어서 경제성을 높일 수 있다는 것을 말해준다.

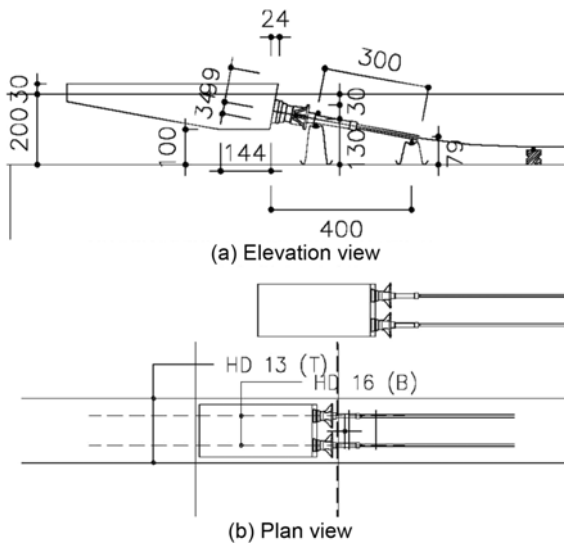


Fig. 11 Anchorage detail

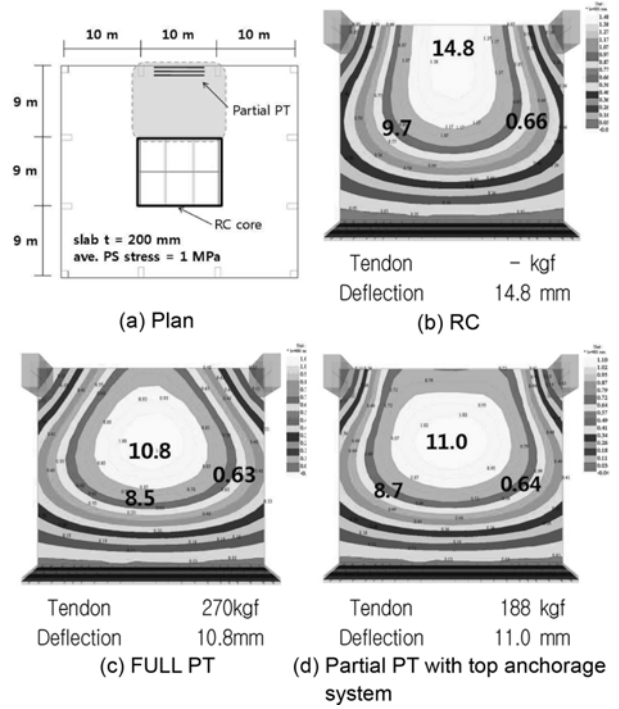


Fig. 12 Deflection contour obtained from FEM analysis for typical slab

6. 현장적용 및 계측

본 연구에서 제안 검토된 상향긴장식 부분PT공법의 실질적인 검증을 위하여 Fig. 13에 보이는 바와 같이 국내의 M프로젝트 현장의 슬래브에 부분PT공법을 실제로 적용하였다. Fig. 14(a) 및 (b)에 나타난 바와 같은 텐던 배치로 지상 7층 슬래브에 일반적인 측면 정착구를, 지상 8층 슬래브에 상향긴장방식의 정착구를 적용하여 이를 비교 분석하고자 하였으며, 현장계측을 통하여 얻어진 측

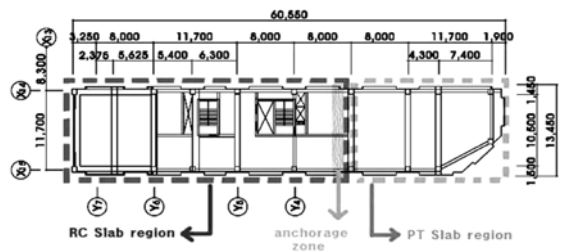


Fig. 13 M project

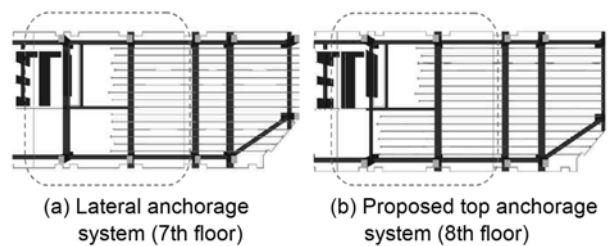


Fig. 14 Tendon layout with different anchorage system on slabs (M project)

정값과 해석값을 비교하여 구조성능을 검토하였다.

6.1 슬래브 해석

슬래브 해석은 콘크리트 압축강도 (f_{ck})는 30 MPa, 긴장력은 $0.8f_{pu}$, 곡률마찰계수 0.07/radian, 파상마찰계수 0.0328/m 을 전제로 하였으며, 하중조합은 1.0PS와 1.0SW + 1.0PS 의 두 경우에 대하여 분석하였다. 여기서, f_{pu} 는 긴장재의 인장강도, PS는 긴장력, SW는 슬래브의 자중을 나타낸다. 해석은 ADAPT¹⁵ 프로그램을 사용하였으며, 해석결과 는 지면제한상 Appendix에 축약하여 나타내었다. 여기서, 모든 응력은 인장이 (+), 압축은 (-)로 표현되었다.

일반 측면정착구를 적용한 7층 슬래브에서 1.0PS의 하중조합으로 인해 치솟음이 상향 11 mm가 발생하였고, 정착구 후면에서 상부에 0.04 MPa, 하부에 0.16 MPa 정도의 인장응력이 발생하였다 (Fig. A1 참조). 상향긴장식 정착구를 적용한 8층의 경우 동일 하중에서 치솟음은 거의 유사하게 나타났으며, 정착구 후면에서 상부에 0.48 MPa 하부에 1.60 MPa 정도의 인장응력이 발생하였다.(Fig. A2 참조) 1.0SW + 1.0PS의 하중조합의 경우 7층에서는 처짐이 상향으로 2 mm 수준이었으며, 정착구 후면의 응력은 정모멘트의 영향으로 인하여 상부에서 -0.55 MPa, 하부에서 0.41 MPa의 분포를 나타내었다 (Fig. A3 참조). 동일 하중하에서 8층의 경우에는 처짐이 상향으로 2 mm 수준으로 7층의 경우와 동일하였으며, 정착구 후면의 응력은 부모멘트의 영향으로 상부에 1.23 MPa, 하부에 -0.27 MPa 을 나타내었다 (Fig. A4 참조). 따라서, 처짐제어는 상향 긴장방식을 적용하였을 때와 일반 측면정착구를 적용할 경우에 거의 동일한 효과를 보임을 알 수 있으며, 상향 긴장으로 인하여 정착구 후면에 발생하는 인장응력은 일반적인 정착구보다는 증가되었지만 허용인장응력과 비슷한 수준이므로 4.2 및 4.3에서 언급한 바와 같은 적절한 부착철근의 배치를 통하여 균열제어에 전혀 무리가 없음을 알 수 있다.

동일한 평면을 가진 RC슬래브와 비교하면 (Fig. A5 참조) 상향긴장식 부분PT공법의 상대적인 처짐제어 효율성 알 수 있다. RC슬래브의 경우 자중만을 고려하였을 때 (1.0SW), 중앙부 처짐이 약 9 mm 정도로서 부분PT를 도입한 경우에 비하여 매우 크게 나타나며, 인장응력도 콘크리트의 휨인장 균열응력 ($0.63\sqrt{f_{ck}} = 3.4 \text{ MPa}$)수준으로 분포하였다. 따라서 상향긴장식 부분PT공법을 적용할 경우에 RC에 비해 처짐제어 및 인장구간에서의 응력제어에 매우 유리함을 알 수 있다.

6.2 현장계측 및 분석

일반적인 측면 정착구 및 상향긴장식의 정착구를 적용한 부분PT슬래브의 실제 구조거동을 계측하기 위하여 현장에서 긴장재를 배치할 때 정착구 주변에 배치된 철근에 변형률 게이지와 콘크리트 게이지를 설치하였다. 계

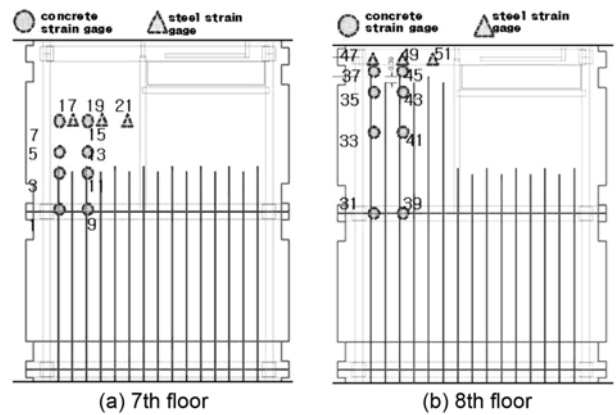


Fig. 15 Location of strain gages, M project

이지는 Fig. 15에 나타난 바와 같이 긴장재 주변, 상부 정착구의 앞쪽 및 뒤쪽, 기타 경간 내부에 매설하였다. 게이지로부터 연결된 데이터 수집장치를 통하여 긴장작업 전과 긴장작업 중, 긴장작업 후의 변형률을 측정하였다. 긴장작업 전에 측정한 변형률을 기준으로 긴장작업 중과 긴장작업 후의 상대적인 변형률을 구하고, 이를 응력으로 환산하여 Fig. A6에 해석값과 비교하여 나타내었다. Fig. A6에서 글상자 윗부분에 나타난 응력값은 순서대로 각각 슬래브 상부와 하부의 계측값이며, 글상자 아랫부분은 각각 슬래브 상부와 하부의 해석값이다. 7층 슬래브에서 정착구 후면의 응력은 0.2~0.5 MPa, 정착구 앞쪽의 압축응력은 1.7~2.0 MPa 범위의 분포를 보이는 것으로 계측되었다 (Fig. A6 (a) 참조). 상향긴장방식이 적용된 8층의 경우, 정착구 후면의 인장응력은 0.1~1.0 MPa, 정착구 앞쪽의 압축응력은 0.5~1.7 MPa의 분포를 보였다 (Fig. A6 (b) 참조). 7층과 8층의 정착구 앞쪽에 나타나는 압축응력을 비교해 보면 매우 유사한 범위의 분포를 보이지만 상향긴장방식이 적용된 8층에서 약간 낮은 값을 보였다. 또한, 일반적인 정착구의 비하여 상향긴장방식을 적용한 경우에 정착구 후면에서 인장응력이 다소 크게 발생하였지만 허용응력을 만족하는 범위 내에 있어 현장적용에 큰 무리가 없음을 알 수 있다. 정착구 주변 이외의 응력값들은 7층과 8층의 위치에서 다소 차이가 있는데 이는 정착구 및 텐던의 배치길이가 다르기 때문이다. 그러나, 해석 결과가 계측 결과와 거의 유사한 범위내로 일치하므로 설계단계에서 예측된 응력값을 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 보여 현장적용에 문제가 없는 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 최근 국내에서 대두되고 있는 무량관구조의 적용 확대에 따른 처짐 문제를 해결할 수 있는 효율적인 방법으로, 국내의 현실 여건상 당장 도입하기 어려운 완전PT공법 대신 이를 보완할 수 있는 부분PT공법을 제안하였다. 또한 긴장 작업시 시공성이 떨어지는 점

을 개선하고자 슬래브 내에서 긴장할 수 있는 상향긴장장 방식을 적용함으로써 시공성을 높이고자 하였다. 이러한 상향긴장식 부분PT공법의 적용에 대한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 상향 긴장식 부분PT공법은 완전PT에 비하여 적은 긴장재량으로 거의 대등한 처짐제어 효율을 가지기 때문에 경제적이며, 완전PT공법의 적용이 어려운 국내현실을 감안할 때 적용성이 매우 우수한 공법이다.
- 2) 상향긴장방식은 슬래브 내부에서 긴장하기 때문에 정착구 후면에서 발생하는 인장응력을 제어하여야 하며, 이는 적절한 철근의 배치를 통하여 용이하게 제어할 수 있음을 확인 할 수 있었다.
- 3) 본 논문에서 제시한 정착구 위치계수를 사용하여 정착구 위치에 따른 처짐 제어효율을 용이하게 산정할 수 있으므로 초기설계단계에서 이를 신속히 반영할 수 있다.
- 4) 상향긴장식 부분PT공법은 처짐 또는 인장응력이 크게 발생되는 부분 구간에만 선택적으로 적용하면 적은 비용증가로 큰 처짐효율을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준, 건설교통부 고시 제2006-435호, 2006, 29 pp.
2. 건축법 시행령, 일부개정 2008.9.22 대통령령 제21025호, 2008, 103 pp.

3. Alami, B. O., 정광량, 포스트 텐션 바닥시스템의 설계, 태림 문화사, 2003, 238 pp.
4. Nilson, A. H. and Walters, D. B., "Deflection of Two-Way Floor System by Equivalent Frame Method," *ACI Structural Journal*, Vol. 72, No. 5, 1975, pp. 210~218.
5. Nilson, A. H., *Design of Prestressed Concrete*, 2nd ed., John Wiley & Sons. 1987, 426~439.
6. PTI (Post Tention Institute), *Post-Tensioning Manual*, 6th ed., Post-Tensioning Institute, 2006, 354 pp.
7. Collins, M. P. and Mitchell, D., *Prestressed Concrete Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991, 766 pp.
8. Nawy, E. G., *Prestressed Concrete Fundamental Approach*, Fifth Edition, Prentice-Hall, 2006, 945 pp.
9. Alami, B. O., "Load Balancing : Comprehensive Solution to Post-Tensioning," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 6, 1990, pp. 662~670.
10. Hibbeler, R. C., *Structural Analysis*, Prentice-Hall, Inc., 2006, 644 pp.
11. CAST, http://cee.uiuc.edu/kuchma/strut_and_tie/, 2005.
12. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준해설, 한국콘크리트학회, 2007, pp. 252~27.
13. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005, pp 276~282.
14. 한국콘크리트학회, 주거용 건물의 부분PT공법 최적화 연구, 한국콘크리트학회, 2008, 256 pp.
15. ADAPT, *ADAPT-FLOOR PRO User Manual*, ADAPT Corp, 2007, 298 pp.

Appendix

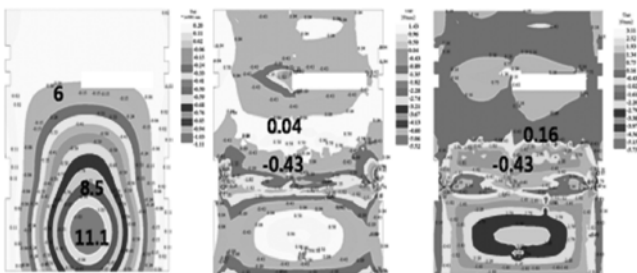


Fig. A1 7th floor, M project (load combination: 1.0 PS)

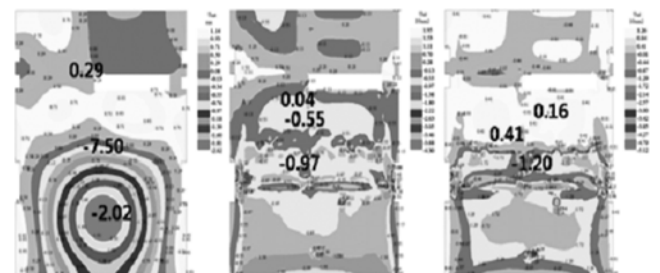


Fig. A3 7th floor, M project (load combination: 1.0 PS + 1.0 SW)

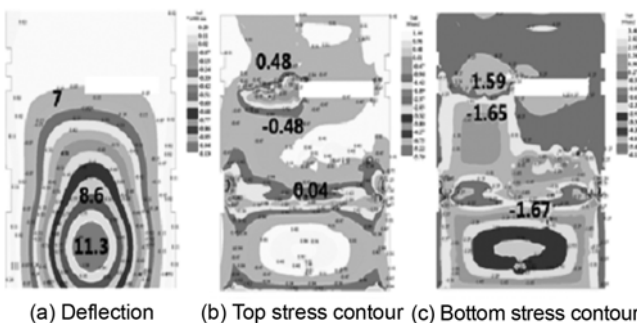


Fig. A2 8th floor, M project (load combination: 1.0 PS)

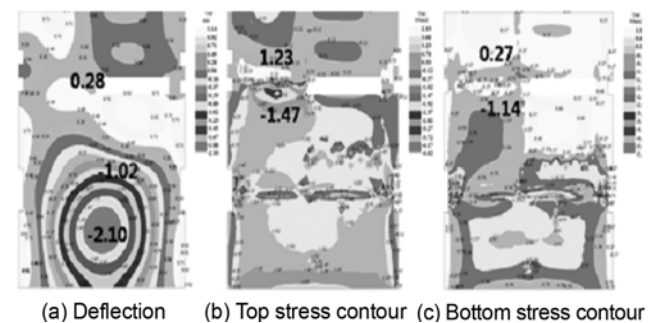


Fig. A4 8th floor, M project (load combination: 1.0 PS + 1.0 SW)

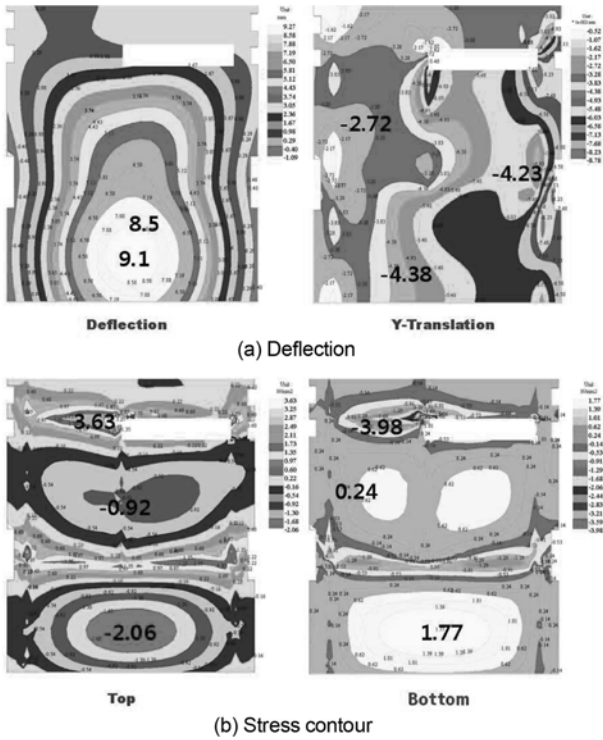


Fig. A5 Reinforced concrete floor, M project

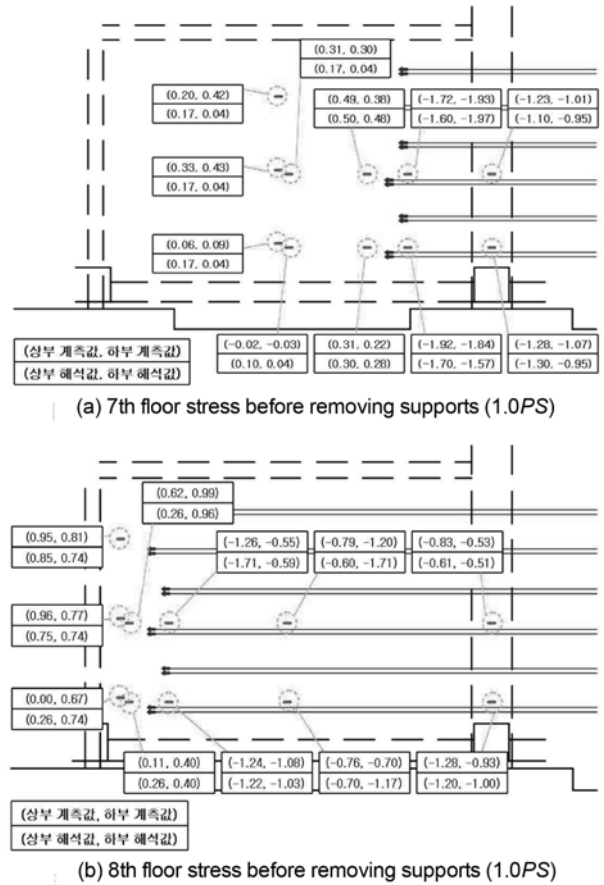


Fig. A6 Floor stresses from measurement and analysis

요약 최근에 들어서 국내에서도 무량판 구조 (flat plate slab)가 적용될 수 있는 여건이 마련되어가고 있다. 그러나 무량판 구조는 보가 없는 구조이기 때문에 일반적인 라멘구조형식에 비하여 처짐 제어가 어려우며, 포스트텐션 (post-tension)공법은 이러한 문제점을 극복하기 위한 매우 효율적인 방법이다. 포스트텐션 구조를 적용하면 슬래브 두께의 증가 없이도 효율적으로 슬래브의 처짐을 제어 할 수 있다. 그러나, 이러한 장점에도 불구하고, 국내에서 포스트-텐션의 적용은 비용증가, 기술적인 문제, 경험부족 등으로 인하여 그 적용이 매우 제한적이다. 따라서 전구간 포스트텐션 (full-PT)에 대한 부담을 줄이고 나아가 기존 포스트텐션 구조형식의 시공성을 향상하기 위하여 본 연구에서는 슬래브 내부에서 긴장작업을 수행할 수 있는 상향긴장식 부분PT공법을 제안하였다. 이러한 상향긴장방식은 정착구를 필요에 따라 다양한 위치에 설치할 수 있기 때문에 처짐 효율에 대한 분석이 필요하며, 정착구 후면에서 인장응력을 야기시키는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 상향긴장식 부분PT공법 적용할 때 정착구 위치에 따른 처짐효율분석, 유한요소해석 및 스트럿-타이를 이용한 인장응력 또는 인장력 해석 등을 실시하였으며, 상향긴장식 부분PT공법을 실제로 현장에 적용하고, 계측결과를 해석결과와 비교 분석함으로써 현장적용성을 알아보았다. 상향긴장식 부분PT공법은 처짐 또는 인장응력이 크게 발생하는 부분 구간에만 선택적으로 적용하면 적은 비용증가로 큰 처짐효율을 얻어낼 수 있음을 확인하였다.

핵심어 : 부분 프리스트레스트 공법, 포스트텐션, 상향긴장 정착구, 처짐제어, 인장응력