

# 원형 정착판을 사용한 포스트텐션 특수정착구의 설계에 관한 연구

최규형<sup>1</sup>, 노병철<sup>2\*</sup>, 임정훈<sup>3</sup>

## A Study on the Design of Special Circular Plate Anchorage for Post-tension

Kyu-Hyung Choi<sup>1</sup>, Byeong-Cheol Lho<sup>2\*</sup>, Jung-Hoon Lim<sup>3</sup>

**Abstract:** Bearing stress near anchor plates is usually very high due to prestressing force in anchorage zone of concrete structure used post-tensioned prestressed method. In order to effective utilization of cross section and crack control, appropriate size of anchorage plates should be used to prevent crack initiation and failure of concrete structures eventually. This study aims to suggest equation for effective area of bearing plate of rectangle type and circular type by Highway Bridge Design Specification and PTI etc. A shape factor according to bearing plate shape is suggested based on numerical analysis, and it can be used suitability for design of special anchorage plate dimension.

**Keywords:** Bearing stresses, Ratio of bearing plate area, Shape factor, Local zone, Special anchorage plate

### 1. 서 론

콘크리트구조물에서는 단면의 효율적 활용 및 균열 억제 효과를 위해 프리스트레스 공법이 주로 사용되고 있다. 이중 포스트텐션공법은 프리스트레스 힘을 가한 강연선을 정착구의 정착판이 지지하는 구조로 되어있다.

따라서 정착구 주변 콘크리트에는 프리스트레스 하중에 의해 높은 응력이 복잡하게 작용하므로, 적절한 정착판의 크기가 설정되지 않는다면 정착구역에 균열을 발생될 수 있고, 구조물의 파괴로 이어질 수 있다.

한편, 포스트텐션 정착구는 기본 정착구와 특수 정착구로 구분하며, 기본 정착구는 특정범위에 있는 사각형 정착판을 적용한 정착구이고, 기본 정착구의 형태에서 벗어난 정착구는 특수 정착구로 분류한다. 국내외 정착구에 관한 규정은 기본 정착구를 기준으로 하고 있으며, 형태 및 특성이 다양한 특수 정착구에 대해서는 승인시험을 통과하도록 규정하고 있다 (MOLIT, 2010; PTI, 2000).

또한, 긴장재의 선정과 정착장치의 위치 결정, 철근 보강, 긴장 순서를 포함한 전반적인 설계와 시공에 관련된 상세 사

항은 설계 도면으로 작성하여 시공 전에 공사 책임자의 승인을 받도록 규정하고 있다(MOLIT, 2012; KIBSE, 2015).

이와 같이 포스트텐션 정착구에 관한 규정은 기본 정착구일 경우, 허용제한범위를 만족하도록 규정하고 있으며, 특수 정착구일 경우 승인시험을 통과하도록 규정하고 있다. 따라서 정착구의 성능평가는 대부분 정착구 제조사의 시험 성적서에 의존하고 있다.

최근에는 정착판의 단면저감 효과 및 모서리 응력집중 개선을 위해 정착판을 사각형에서 원형으로 개선한 특수 정착구의 활용이 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 원형 정착판을 갖는 특수 정착구 설계를 위한 포스트텐션 정착구의 기본적인 설계 방법을 제안하고 기본 설계 활용 및 설계검토가 가능하도록 하고자 하였다. 이를 위해 국내외 규정을 분석하여 설계흐름을 설정하였고, 유한요소해석을 통해 설계 방법을 제시하였으며, 국내외 기존 정착구와 비교분석을 수행하여 적합성을 분석하였다.

### 2. 포스트텐션 정착구의 정착판 설계 제안

#### 2.1 기본 정착구의 관련규정

전술한 바와 같이 국내외 정착구에 관한 규정은 사각형 정착판으로 된 기본 정착구와 특수 정착구로 구분하고 있다.

기본 정착구에 대한 국내 설계규정은 도로교설계기준 등 해외 설계규정은 PTI에서 발간한 Acceptance Standards for

<sup>1</sup>정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 공학박사

<sup>2</sup>중신회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 박사과정

\*Corresponding author: belho@sangji.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Sangji University, Sangjidae-gil 83, Woosan-dong, Gangwon-do, 26339, KOREA

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

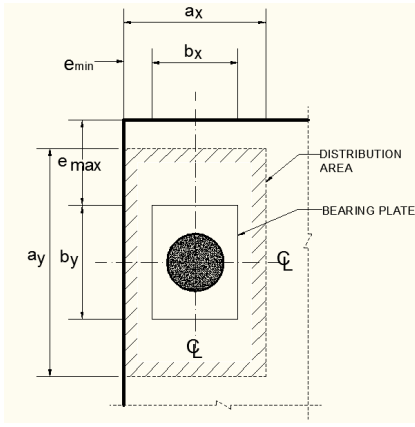


Fig. 1 Basic Anchorage Plate(PTI, 1998)

Post-Tensioning Systems(1998), AASHTO에서 발간한 Standard Specification for Highway Bridges(2002) 등에 명시되어있다 (Prestressed Concrete Committee, 2014).

Fig. 1은 PTI(1998)에서 제안한 기본 정착구의 정착판 형상을 나타낸 것으로 그림에 나타낸 바와 같이 사각형 정착판에 리브가 없는 형태를 기본 정착구로 정의하고 있다.

여기서,  $a_x, a_y$ 는  $x, y$ 방향에 따른 콘크리트 단면 길이이며,  $b_x, b_y$ 는  $x, y$ 방향에 따른 정착판의 길이이다.  $e_{max}, e_{min}$ 은 정착판 모서리부터 콘크리트까지의 거리를 나타내는 것으로 큰 쪽이  $e_{max}$ , 작은 쪽이  $e_{min}$ 이며, 식 (1)을 만족하도록 규정하고 있다.

$$\begin{aligned} \text{if } e_{min} > 0.5b & \text{ then } a = 2b \\ \text{if } e_{min} < 0.5b & \text{ then } a = (b + 2e_{min}) \\ \text{but } e_{max} < 4e_{min} \end{aligned} \quad (1)$$

기본 정착구에 대한 국내외 규정은 크게 유효지압강도와 허용지압응력에 대한 규정으로 나눌 수 있다.

도로교설계기준(2010)에는 식 (2)와 같이 유효 지압강도의 크기에 대하여 규정하고 있다.

$$f_b \leq 0.7\phi f_{ci}' \sqrt{\frac{A_c}{A_g}} \quad (2)$$

$$\text{단, } f_b \leq 2.25\phi f_{ci}'$$

여기서,  $f_b$ 는 정착판의 유효지압강도(MPa),  $f_{ci}'$ 는 프리스트레스 도입 시의 콘크리트 강도(MPa),  $A_c$ 는 정착판을 지지하는 콘크리트의 단면적( $\text{mm}^2$ ),  $A_g$ 는 정착판의 총 단면적( $\text{mm}^2$ ),  $\phi$ 는 강도감소계수로 정착구역 강도감소계수는 0.85

이다.

PTI(2000) 및 AASHTO(2014)에서는 국소구역의 횡방향 구속보강 비율을 기준으로 제안하고 있으며, 횡방향 구속보강 비율  $\rho_s = 0$ 일 경우 식 (3)을 적용하고,  $\rho_s > 2\%$ 일 경우 식 (4)를 적용하도록 제안하고 있다.

$$f_b \leq 0.5f_{ci}' \sqrt{\frac{A_c}{A_g}} \leq 1.0f_{ci}' \quad (3)$$

$$f_b \leq 0.75f_{ci}' \sqrt{\frac{A_c}{A_g}} \leq 1.5f_{ci}' \quad (4)$$

국내의 규정에 따라 유효지압강도를 계산하는 방법에서 차이가 있는데 식 (5)는 도로교설계기준(2010)에서 제안한 식이고, 식 (6)은 PTI(2000) 및 AASHTO(2014)에서 제안한 식이다.

$$f_b = \frac{1.2A_{ps}f_s'}{A_b} \quad (5)$$

$$f_b = \frac{P_{jack}(=0.8A_{ps}f_s')}{A_b} \quad (6)$$

여기서,  $A_{ps}$ 는 강연선의 공칭 단면적( $\text{mm}^2$ ),  $f_s'$ 는 강연선의 항복강도(MPa),  $A_b$ 는 정착판의 유효면적으로 정착판 전체 단면적( $A_g$ )에서 정착판의 덕트 개구부 단면적을 제외한 면적( $\text{mm}^2$ )이다.

도로교설계기준(2010)의 경우, 작용하는 프리스트레스 하중에 대하여 하중계수를 적용함으로써 안전을 고려하였고, PTI(2000) 및 AASHTO(2014)에서는 일반적으로 프리스트레스 하중이 가해질 때 강연선 최대 강도의 80%가 재하되는 것으로 고려하고 있다.

정착판에 작용하는 허용지압응력에 대한 규정은 도로교설계기준(2010)에서는 식 (7)에 나타낸 바와 같이 강연선 정착 직후와 프리스트레스 손실 발생 후로 나누어 제안하고 있으며, PTI(2000) 및 AASHTO(2014)에서는 식 (8)에 나타낸 바와 같이 강연선 정착 직후에 대해서 제안하고 있다.

$$\text{강연선 정착 직후 } 0.70f_{ci}' \sqrt{\frac{A_c}{A_g}} - 0.2 \leq 1.10f_{ci}' \quad (7)$$

$$\text{프리스트레스 손실 발생 후 } 0.5f_{ck}' \sqrt{\frac{A_c}{A_g}} \leq 0.90f_{ck}$$

$$0.8f_{ci}' \sqrt{\frac{A_c}{A_g}} - 0.2 \leq 1.15f_{ci}' \quad (8)$$

이상의 분석에 나타난 바와 같이 기본 정착구에 대하여 국내의 규정에서 유효지압강도 및 허용지압응력에 대한 규정을 제안하고 있으나, 특수 정착판에 대한 설계 기준은 제조사에 따라 상이하므로 특별한 규정을 일반적으로 제안하는 것은 쉽지 않다.

## 2.2 정착판의 설계 방법 제안

프리스트레스 하중에 따른 정착판 설계는 유효지압강도 제안식에 의하여 도출할 수 있다. 이를 위해 도로교설계기준(2010)에 의한 방법과 PTI(2000)에 의한 방법에 대하여 각각 검토를 수행하였다.

도로교설계기준(2010)의 식(2)와 식(5)는 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_b \geq \frac{1.7A_{ps}f'_s}{\phi f'_{ci}} \sqrt{\frac{A_g}{A_c}} \quad (9)$$

횡방향 구속보강 비율에 따라 유효지압강도를 구분하는 PTI(2000)의 제안식은 일반적으로 7가닥 이상의 다발텐던용 정착구 주변에는 나선 보강을 수행하므로 식(4)와 식(6)을 이용하여 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_b \geq \frac{1.1A_{ps}f'_s}{f'_{ci}} \sqrt{\frac{A_g}{A_c}} \quad (10)$$

식(9)와(10)에 의해 정착판의 유효면적  $A_b$ 는 프리스트레스 하중에 따라 계산될 수 있다.

여기서,  $A_g$ 는  $A_b$ 와 관계가 있고,  $A_c$ 는 프리스트레스 하중과 정착판에 의해 발생하는 응력을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 콘크리트가 부담하는 하중과 정착판이 부담하는 하중 비율을 정착판의 형상에 따라 국소구역의 거동을 고려하여  $A_g/A_c$ 를 가정하여 계수화 하였다.

따라서 정착판의 유효면적  $A_b$ 는 식(11)과 같이 제안할 수 있다.

$$A_b \geq K \frac{A_{ps}f'_s}{f'_{ci}} \quad (11)$$

여기서,  $K$ 는 형상계수이고, 정착판 총면적  $A_g$ 는 정착판 유효면적  $A_b$ 에서 덕트 개구부 면적을 제외한 면적이므로 식(12)에 의해 구할 수 있다. 여기서,  $A_i$ 는 덕트 개구부 면적( $\text{mm}^2$ )이다.

$$A_g = A_b + A_i \quad (12)$$

형상계수  $K$ 는  $A_g/A_c$ 를 포함하고 있으므로 정착판 형상에 따라 최적의  $A_g/A_c$ 를 도출하여야 한다.

본 연구에서는 정착판 형상에 따른  $A_g/A_c$ 를 도출하기 위해 기존의 식을 바탕으로 사각형 정착판에 대한 최적의  $A_g/A_c$ 를 도출하고 이를 바탕으로 원형 정착판의  $A_g/A_c$ 를 도출하여 형상계수  $K$ 를 결정하였다.

Fig. 2는 동일한 강연선과 콘크리트를 사각형 정착판에 적용하였을 때,  $A_g/A_c$ 를 0.1 ~ 0.3까지 가정하여 도로교 설계기준(2010)과 PTI(2000)에 의한 정착판 유효면적을 프리스트레스 하중의 크기에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이  $A_g/A_c$ 가 증가할수록 정착판 유효단면적은 증가하는 것으로 나타났으며, 도로교설계기준(2010)에 의한 설계가 PTI(2000)에 의한 설계보다 동일한 프리스트레스 하중에 대해서 유효면적이 크게 설계되는 것으로 나타났다.

여기서,  $A_g/A_c$ 를 일정비율로 고정하는 것은 프리스트레스 하중에 따라 정착판과 콘크리트 단면적 비율이 항상 일정한 것을 의미하지만, 실제 적용되는 정착판의 설계는 이와 다르게 설계되고 있다. 또한  $A_g/A_c$ 를 어느 것으로 정하느냐에 따라 정착판 및 콘크리트 단면적이 달라지므로 이에 대한 제한이 필요하다.

정착구역에서 콘크리트 단면적은 프리스트레스 하중이 작용하는 정착판을 지지해야 하므로 작게 설계할 경우 정착구역의 파괴를 초래할 수 있고, 크게 설계할 경우 부재가 커져야 하므로 비경제적인 설계가 된다.

따라서 본 연구에서 제안하는 설계 방법은 정착판 유효면적을 설계하기 위한  $A_g/A_c$ 를 제안하여 형상계수  $K$ 를 결정한 후 유효요소해석을 통하여  $A_g/A_c$ 를 수정하는 방법을 제안하였다.

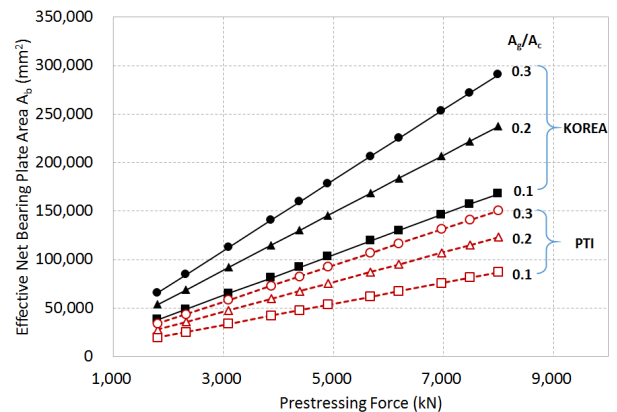


Fig. 2  $A_b$  according to Prestressing Force by  $A_g/A_c$

### 2.3 정착판 설계 흐름

일반적으로 강연선 가닥수와 배치는 구조계산에 의해 결정되고, 정착시스템의 물성과 정착판 덕트 개구부 지름은 경험적 설계에 의해 결정된다.

따라서 정착구 종류에 따라 정착구 및 콘크리트 물성 등을 포함한 정착 시스템의 기본 제원과 적용하는 강연선의 강도 및 가닥수를 결정한 후 유한요소해석을 통해 국소구역 내에서 발생하는 지압응력 분포를 검토하고 이에 근거하여 콘크리트 단면적  $A_c$ 를 설계한다.

정착구에는 일반적으로 나선철근 및 띠철근을 이용하여 보강을 실시한다. 나선철근으로 보강된 정착구는 띠철근으로 보강된 경우보다 극한 및 균열하중이 높게 나타나 보강효과가 우수하다(Lim et al., 1996).

이를 근거로 본 연구에서는 나선철근에 의한 횡방향 구속효과를 고려하고 국소구역 검토를 수행 후 수정 및 보완하여 정착판 제원을 결정하였다.

## 3. 유한요소해석을 활용한 정착판 설계

### 3.1 프리스트레스 하중을 고려한 정착판 설계

Fig. 3은 형상계수  $K$ 를 결정하기 위하여  $A_g/A_c$ 를 0.1 ~ 0.3으로 가정할 때, 식 (9), (10)에 의해 설계된 정착판에 작용하는 지압응력을 허용지압응력과 함께 나타낸 것이다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 PTI(2000)와 도로교설계기준(2010)에 의해 설계된 정착판의 작용 지압응력이 유사하게 나타났다. PTI(2000)에 의해 설계된 정착판에 작용하는 지압응력이 큰 것으로 나타났다. 이는 식 (9)와 (10)의 형태는 유사하지만 강도감소계수와 하중계수 적용으로 인하여 도로교설계기준(2010)에 의해 설계된 정착판이 PTI(2000)에 의해 설

계된 정착판 보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

$A_g/A_c$ 를 0.1~0.2로 고정하였을 때는 각 규정의 허용지압응력을 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 0.3으로 고정하였을 때는 허용지압응력을 만족하는 것으로 나타났다.

따라서 Fig. 3에 의해 정착판을 설계하기 위한  $A_g/A_c$ 는 0.3 이상이 되어야 할 것이다. 그러나 이는 정착구에 보강되는 나선철근의 횡방향 구속효과를 고려하지 않은 것이다.

PTI(2000)에서는 횡방향 구속효과를 고려하기 위하여 식 (13)과 같이 제안하고 있다.

$$P_n = \eta(P_c + P_s) \leq 3f_{ci}' A_b \quad (13)$$

여기서,  $P_n$ 은 횡방향 구속효과를 고려한 국소구역의 공칭 강도(kN),  $P_c$ 는 구속된 콘크리트의 기여도(kN),  $P_s$ 는 횡방향 구속철근의 기여도(kN)를 나타낸 것이다. 또한,  $\eta$ 는 수정계수로 0.85~0.95이다.

$P_c$ 와  $P_s$ 는 각각 식 (14)와 (15)에 의해 구할 수 있다.

$$P_c = 0.83f_{ci}' A_b \sqrt{A_c/A_g} \leq 2f_{ci}' A_b \quad (14)$$

$$P_s = 4.1f_{lat} A_{core} \quad (15)$$

여기서,  $f_{lat}$ 는 횡방향 구속응력(MPa),  $A_{core}$ 는 나선철근에 의해 구속된 콘크리트 심부 면적(mm<sup>2</sup>)이다.

$f_{lat}$ 와  $A_{core}$ 는 횡방향 구속철근의 종류에 따라 달라지는데 일반적으로 나선철근에 의해 국소구역을 보강하므로 식 (16)와 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{lat} = \frac{2A_s f_y}{D_c s} \quad (16)$$

$$A_{core} = \frac{\pi D_c^2}{4} \left(1 - \frac{s}{D_c}\right)^2 - A_{duct} \quad (17)$$

여기서,  $A_s$ 는 나선철근의 공칭 단면적(mm<sup>2</sup>),  $f_y$ 는 나선철근의 항복강도(MPa),  $D_c$ 는 나선철근의 직경(mm),  $s$ 는 나선철근의 간격(mm),  $A_{duct}$ 는 덕트 개구부 면적(mm<sup>2</sup>)이다.

PTI(2000)에 의해 횡방향 보강에 의한 구속효과를 고려하기 위해서는 콘크리트 단면, 국소구역의 크기, 나선철근을 설계하여 나선철근에 의한 횡방향 구속응력 및 제원을 적용하여 식 (13)의  $P_n$ 을 검토하여야 한다.

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 통해 콘크리트 단면과 국소구역을 결정하고 나선철근을 설계하여 횡방향 구속효

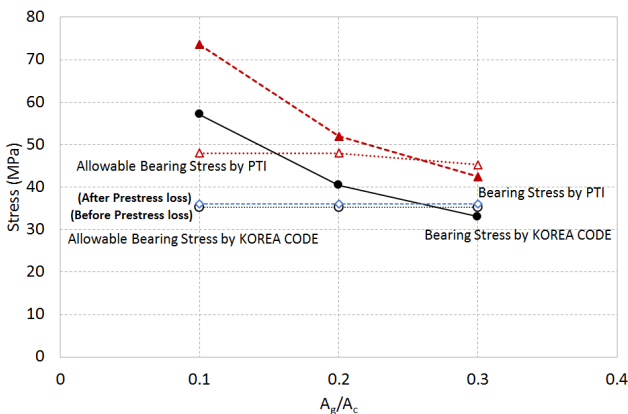


Fig. 3 Bearing Stress According to  $A_g/A_c$

과를 고려하는 방법을 제안 하였다.

### 3.2 유한요소해석기법을 활용한 형상계수 결정 및 콘크리트 단면 설계

#### 3.2.1 정착구역 모델링

횡방향 구속효과를 고려한 정착판 설계를 위해 식 (11)의 정착판 형상계수  $K$ 를 도출하고자 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 이를 위해 정착구 종류는 실무에서 활용도가 높은 7, 15, 19, 31 가닥 정착구를 대상으로 하였고, 정착구, 헤드, 콘크리트로 구성된 정착 시스템의 물성은 Table 1과 같다.

일반적으로 정착구역의 콘크리트 강도는 40 MPa이고, 80% 이상 강도 발현이 되면 프리스트레스를 도입하게 된다. 단, 이때의 강도는 최소 30 MPa 이상이어야 한다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 강도를 프리스트레스 도입 시를 고려하여 32 MPa로 적용하였다.

**Table 1** Properties of Anchorage Assemble

Index	Head	Casting	Concrete
Strength [MPa]	747	295	32
Elastic Modulus [MPa]	200,000	97,000	28,066
Possion's ratio	0.25	0.25	0.167

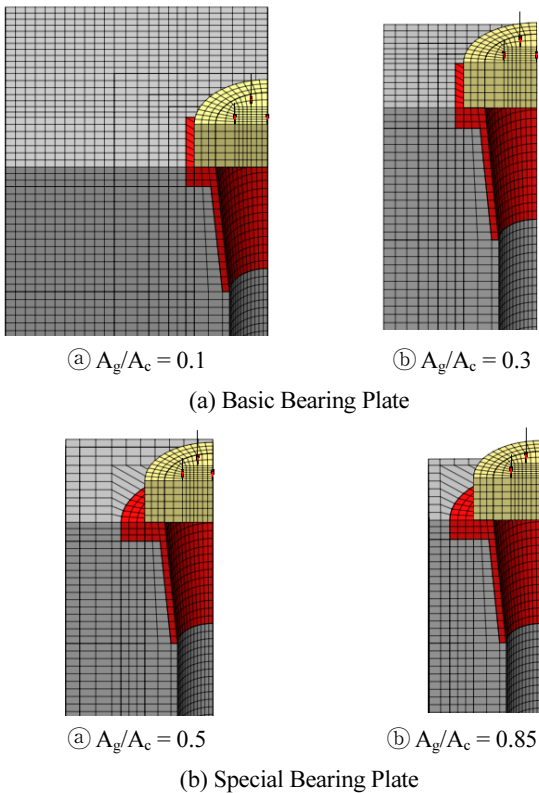
사용된 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS FEA를 사용하였고, 효율적인 해석을 위해 1/4 모델링을 수행하였다. 사용된 요소는 6면체 입체요소를 사용하였으며, 합리적인 설계를 위해 콘크리트 단면의 하중재하 방법 혹은 정착판의 하중재하 방법이 아닌 정착구와 헤드를 모델링하고 강연선의 배치를 반영한 헤드의 하중재하 방법을 적용하였다.

또한, 정착판을 설계하는 단계이므로 선형유한요소해석을 수행하였다. 프리스트레스 하중에 의해 발생하는 국소구역을 확인하고 나선보강 철근을 설계하기 위하여 나선보강 철근이 배근되지 않은 상태를 고려하여 해석을 수행하였다.

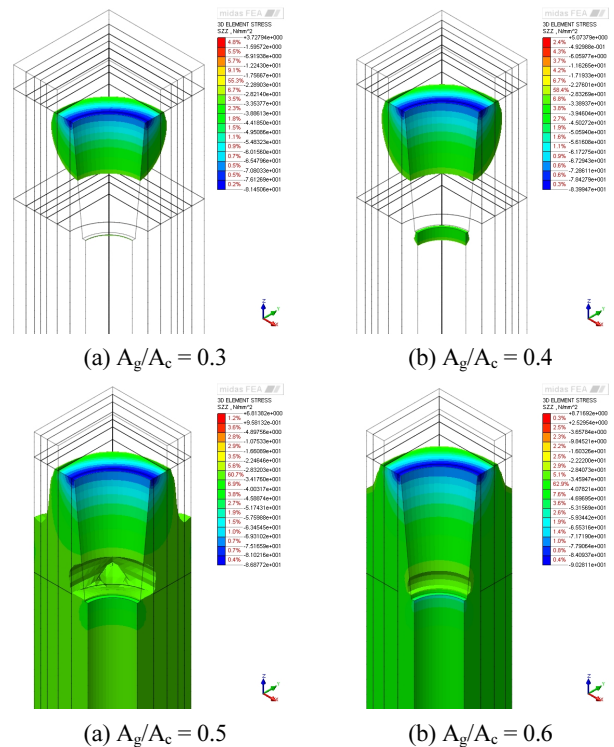
형상계수  $K$ 는 식 (9)와 (10)의  $A_g/A_c$ 를 각각 0.1 ~ 0.3으로 가정하고 정착판을 설계한 후 정착구역의 응력분포를 분석하였다.

콘크리트 단면적  $A_c$ 를 수정하기 위하여  $A_g/A_c$ 에 따라 검토하였으며, 콘크리트 단면적의 설계는 설계된 정착판에 대하여 정착구, 헤드, 콘크리트로 구성된 정착 시스템을 모델링하고  $A_g/A_c$ 가 0.1 ~ 0.7까지 콘크리트 면적에 변화를 주어 국소구역에서 발생하는 응력분포를 검토한 후 콘크리트 면적을 결정하였다.

Fig. 4는 사각형 정착구와 원형 정착구에 대해  $A_g/A_c$ 의 변화에 따른 정착구역 모델링 중 일부만 예를 들어 나타낸 것으로  $A_g/A_c$ 의 변화에 따라 콘크리트 단면적 크기에 차이가 있다. 해석결과 도출된 설계된 정착판, 콘크리트 단면적, 나선철



**Fig. 4** Modeling of Anchorage Zone for Designed Plate



**Fig. 5** Bearing Stress of Anchorage Zone

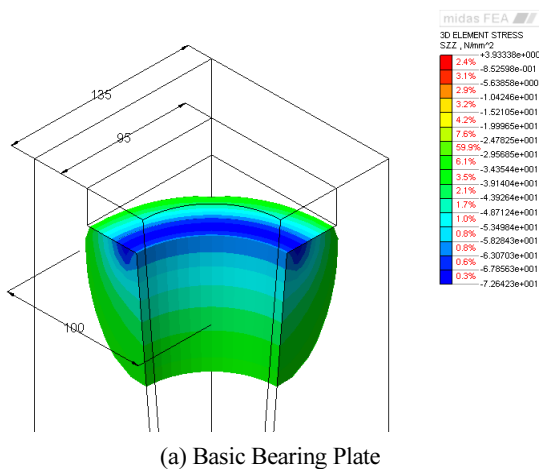


근 보강 등을 식 (13)에 의해 검토하여 만족하는 최적의  $A_g/A_c$ 에 의해 형상계수  $K$ 를 결정하였다.

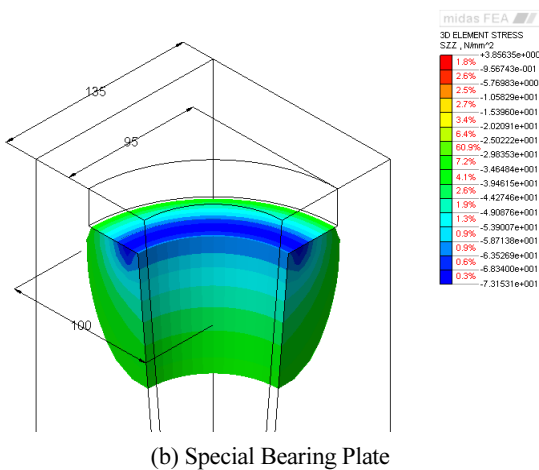
### 3.2.2 기본 정착판의 해석결과

Fig. 5는 Fig. 4에 언급한 모델의 지압응력에 대한 해석결과를 나타낸 것으로  $A_g/A_c$ 의 변화에 따라 콘크리트의 압축강도인 32 MPa 이상이 되는 영역만을 나타낸 것이다.

Fig. 5에 나타낸 바와 같이  $A_g/A_c$ 가 증가하여 콘크리트 면적이 작아질수록 콘크리트 지압응력의 증가로 32 MPa 이상 되는 구역이 증가하는 경향을 나타내었다. (a) 및 (b)와 같이  $A_g/A_c$ 가 0.4까지는 정착구 주변에 32 MPa 이상 되는 구역이 존재하지만, (c) 및 (d)와 같이 0.4를 초과하는 경우, 이 구역은 콘크리트 전체로 확대되었다. 여기서, (a) 및 (b)의 경우, 콘크리트 압축강도가 초과하는 범위에 대해서는 나선철근 등에 의해 횡방향 구속보강으로 압축강도 증가 효과를 줄 수 있고, 이 구역이 국소구역이 된다. (c) 및 (d)의 경우, 이 국소구역을 보강하기 어려우므로 이를 이용하여 콘크리트 단면을 수정하여야 한다.



(a) Basic Bearing Plate



(b) Special Bearing Plate

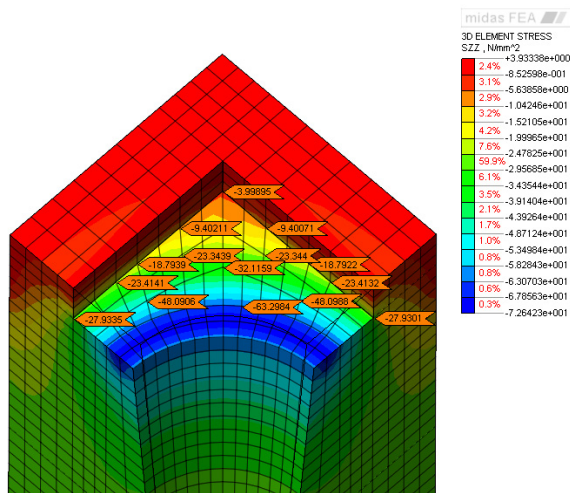
Fig. 6 Stress Distribution of Local Zone

국소구역은 주로 응력개념이 아닌 기하학적 개념으로 도식화하여 제시되어 왔다(Breen et al., 1991). PTI(2000), AASHTO(2014) 및 도로교설계기준 해설(2008)에서도 이와 유사하게 제시하고 있으며, 도로교설계기준(한계상태설계법)(2015)에서는 정착구역을 기하조건으로 제시하고 있다.

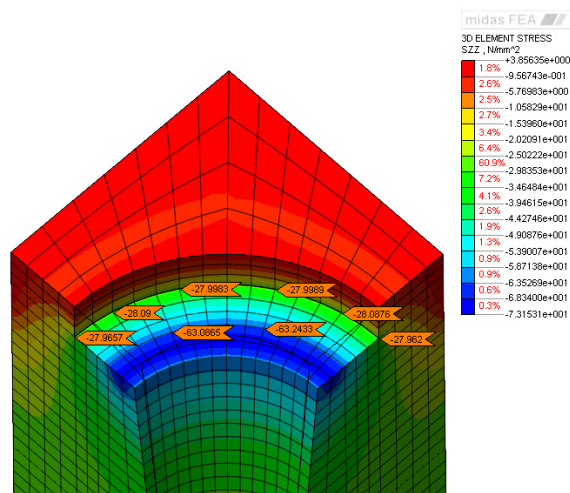
본 연구에서는 정밀설계를 위하여 3차원 해석을 실시하고 나선보강이 필요한 부분을 확인하여 국소구역을 결정하는 것이 합리적인 것으로 판단되므로 이를 통해 콘크리트 단면을 결정하였다.

### 3.2.3 원형 정착판의 해석결과

프리스트레스 하중에 의해 정착판에 발생하는 응력은 정착구를 중심으로 동심원을 그리며 발생하고 사각형 정착판 꼭지점 부근에서는 중심부에 비해 낮은 응력이 발생한다(Choi, 2013). Fig. 5에서도 이와 유사한 경향을 나타내었으며 사각형



(a) Basic Bearing Plate



(b) Special Bearing Plate

Fig. 7 Distribution of Bearing Stress

정착판 꼭지점 하부의 콘크리트는 국소구역에 상응하는 정도의 응력이 발생하지 않았다.

Fig. 6과 Fig. 7은 이를 상세히 분석하고자 정착판 형상별로 국소구역 분포와 콘크리트의 지압응력분포를 각각 나타낸 것이다. 여기서, 사각형 정착판의 크기는 190 × 190 mm, 원형 정착판은  $\phi 190$  mm로 사각형 정착판의 모서리 길이와 원형 정착판의 지름을 동일하게 적용하였고, 콘크리트 단면은 270 × 270 mm, 프리스트레스 하중은 강연선 7가닥일 경우를 동일하게 적용하였다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 정착판의 형상과 관계없이 국소구역은 동심원을 그리며 나타났고, 크기는 동일하게 나타났다. 이는 정착구에 발생하는 국소구역은 정착판의 크기와 형상보다는 작용하는 프리스트레스 하중과 헤드와 정착판이 맞닿는 면적에 지배되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 사각형 정착판의 모서리 부분은 지압응력이 거의 작용하지 않는 것으로 나타났으나, 원형 정착판은 비교적 고르게 분포하고 있는 것으로 나타났다.

즉, 원형 정착판을 적용할 경우 정착판의 전단면에 의해 응력이 고르게 분포되므로 사각형 정착판보다 응력분포 측면에서 효율적인 것으로 나타났다. 따라서 원형 정착판의 형상계수는 국소구역의 응력분포 분석을 통해 결정되는 것은 사각형 정착판과 동일하지만, 별도의 분석을 통하여 결정하는 것이 바람직하다.

### 3.2.4 형상계수에 따른 정착판 및 콘크리트 단면 제원 설계

Table 2와 Fig. 8은  $A_g/A_c$ 의 가정을 통해 결정된 형상계수  $K$ 에 의해 도출한 사각형 정착판의 모서리 길이 혹은 원형 정착판의 지름을 나타낸 것이다.

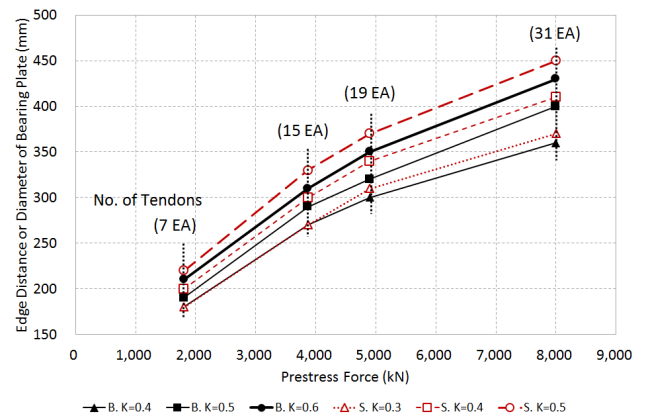
Table 2와 Fig. 8에 나타난 바와 같이 사각형 정착판과 원형 정착판의 형상계수  $K$ 는 0.4 ~ 0.6, 0.3 ~ 0.5의 범위로 각각 결정하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 사각형 정착판 형상계수  $K$ 가 0.4일 때와 원형 정착판 형상계수  $K$ 가 0.3일 때 사각형 정착판 모서리 길이와 원형 정착판 지름이 유사하게 나타났다. 이는 사각형 정착판 형상계수  $K$ 가 0.5, 0.6일 때, 원형 정착판 형상계수  $K$  0.4, 0.5와 각각 유사한 치수를 나타내었다.

이와 같이 정착판의 형상에 따라 형상계수가 다르게 나타난 것은 Fig. 7에 언급한 바와 같이 원형 정착판이 사각형 정착판 보다 상대적으로 작은 면적의 정착판을 활용할 수 있기 때문이다. 따라서 동일한 프리스트레스 하중이 작용할 때 원형 정착판은 사각형 정착판에 비해 정착판의 단면적을 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

Table 3과 Fig. 9는 유한요소해석에 의해 검토된 국소구역의 응력분포 분석에 의해  $A_g/A_c$ 를 수정하여 설계된 콘크리트 단면 모서리 길이를 프리스트레스 하중에 따라 정착구 종류

**Table 2** Designed Edge Distance or Diameter of Bearing Plate

Bearing Plate	No. of Tendons (EA)	PS Force (kN)	K	$A_g/A_c$	Edge Distance or Diameter (mm)
Basic Bearing Plate (Rectangle)	7	1,806	0.4	0.15	180
	15	3,870			270
	19	4,902			300
	31	7,997			360
	7	1,806	0.5	0.2	190
	15	3,870			290
	19	4,902			320
	31	7,997			400
	7	1,806	0.6	0.3	210
	15	3,870			310
	19	4,902			350
	31	7,997			430
Special Bearing Plate (Circle)	7	1,806	0.3	0.1	180
	15	3,870			270
	19	4,902			310
	31	7,997			370
	7	1,806	0.4	0.15	200
	15	3,870			300
	19	4,902			340
	31	7,997			410
	7	1,806	0.5	0.2	220
	15	3,870			330
	19	4,902			370
	31	7,997			450

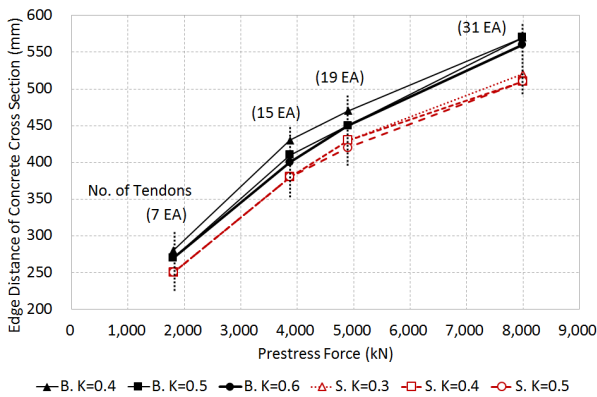


**Fig. 8** Edge Distance or Diameter According to Bearing Plate Shape and Prestress Force

별로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 프리스트레스 힘이 증가할수록 콘크리트 단면적은 증가하여 Fig. 8과 유사

**Table 3** Designed Edge Distance of Concrete Cross Section

Bearing Plate	No. of Tendons (EA)	PS Force (kN)	Modified $A_g/A_c$	Edge Distance of Con'c Cross Section (mm)
Basic Bearing Plate (Rectangle)	7	1,806	0.4	280
	15	3,870		430
	19	4,902		470
	31	7,997		570
	7	1,806	0.5	270
	15	3,870		410
	19	4,902		450
	31	7,997		570
	7	1,806	0.6	270
	15	3,870		400
	19	4,902		450
	31	7,997		560
Special Bearing Plate (Circle)	7	1,806	0.4	250
	15	3,870		380
	19	4,902		430
	31	7,997		520
	7	1,806	0.5	250
	15	3,870		380
	19	4,902		430
	31	7,997		510
	7	1,806	0.6	250
	15	3,870		380
	19	4,902		420
	31	7,997		510



**Fig. 9** Edge Distance of Concrete Cross Section according to Bearing Plate Shape and Prestressing Force

한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Table 3에 나타난 바와 같이 콘크리트 단면 모서리 길이 설

계를 위해 수정된  $A_g/A_c$ 는 사각형 정착판과 원형 정착판이 동일하였으나, 원형 정착판이 사각형 정착판 보다 상대적으로 면적이 작기 때문에 콘크리트 단면적도 감소한 것으로 나타났다. 즉, 국소구역은 콘크리트 단면의 크기보다 정착판 면적과의 비율에 의해 지배됨을 알 수 있다.

#### 4. 나선보강 설계 및 정착판 국소구역 검토

전술한 바와 같이 횡방향 구속효과를 고려하여 정착판을 설계하기 위해서는 식 (13)의 조건을 만족하여야 하고, 국소구역의 나선보강 설계가 선행되어야 한다. 이를 위하여 제안 식 (11)에 의해 설계된 정착판에 대하여 국소구역 나선보강 설계를 수행하였고, 횡방향 구속효과를 고려한 국소구역의 강도를 검토하였다.

##### 4.1 국소구역 나선보강 설계

식 (13)에 의해 횡방향 구속보강을 고려한 정착판 설계를 위해서는 횡방향 구속철근을 설계한 후 이를 정착판 검토 시 반영하여야 한다.

일반적으로 나선철근의 설계는 식 (18)을 이용하여 설계할 수 있다(Breen et al., 1991).

$$A_s = \frac{f_b - 0.85f_{ci}'}{8.2f_s} D_c s \quad (18)$$

여기서, 나선철근의 직경  $D_c$ 는 해석에 의해 구해지는 나선철근 지름으로, Fig. 7과 같이 각 정착구마다 유한요소해석에 의해 발생된 국소구역의 최대 지름(mm)으로 선정하는 것이 바람직하다.

Table 4는 식 (18)에 의해 설계된 나선철근을 나타낸 것이다. 나선철근 간격  $s$ 와 나선철근량  $A_s$ 는 일반적으로 실무에서 사용되는 제원을 식 (13)의 조건에 최대한 만족할 수 있는 범위에서 선택하였다.

Table 4에 나타난 바와 같이 해석결과로부터 도출한 나선철근 지름  $D_c$ 는 강연선 가닥수에 따라 거의 유사하게 나타났다. 이는 국소구역의 발생이 정착판의 면적에 의해 제어되는 것이 아니라 프리스트레스 하중과 헤드 면적에 의해 제어되는 것으로 판단된다.

##### 4.2 정착판의 설계 검토 및 형상계수 제한

설계된 정착판에 대하여 횡방향 구속효과를 고려한 검토를 위하여 PTI(2000)에서 제안한 국소구역 검토를 수행하였다.



**Table 4** Spiral Reinforcements Designed by Eq. 18

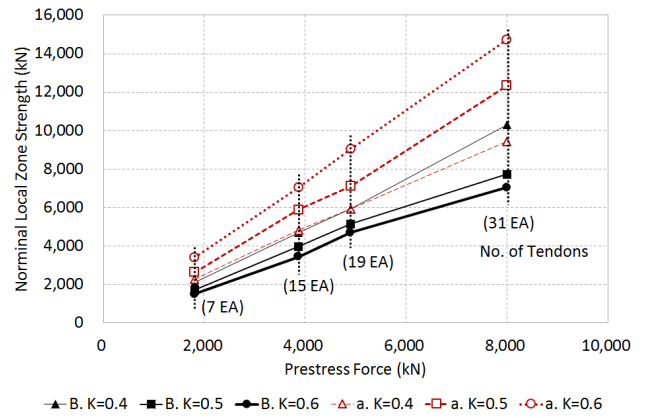
Bearing Plate	K	No. of Tendons (EA)	D <sub>c</sub> (mm)	s (mm)	req. A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )	used A <sub>s</sub>
Basic Bearing Plate (Rectangle)	0.4	7	200	40	152	D16
		15	300	45	263	D19
		19	330	50	339	D22
		31	400	50	448	D25
	0.5	7	200	40	117	D13
		15	300	45	181	D16
		19	330	50	244	D19
		31	400	50	261	D19
	0.6	7	200	40	65	D10
		15	300	45	121	D13
		19	330	50	143	D16
		31	400	50	174	D16
Special Bearing Plate (Circle)	0.3	7	200	40	261	D19
		15	300	45	467	D25
		19	330	50	514	D29
	0.4	31	420	50	664	D32
		7	200	40	164	D16
		15	300	45	284	D19
	0.5	19	330	50	332	D22
		31	400	50	411	D25
		7	200	40	102	D13
	0.5	15	300	45	173	D16
		19	330	50	214	D19
		31	400	50	265	D19

Fig. 10과 Fig. 11은 제안식 (11)에 의해 설계된 사각형 정착판과 원형 정착판의 국소구역 검토를 나타낸 것이다. 여기서, 실선은 정착판에 의해 발생하는 국소구역 공칭강도를 나타낸 것이고, 점선은 허용강도를 나타낸 것이다.

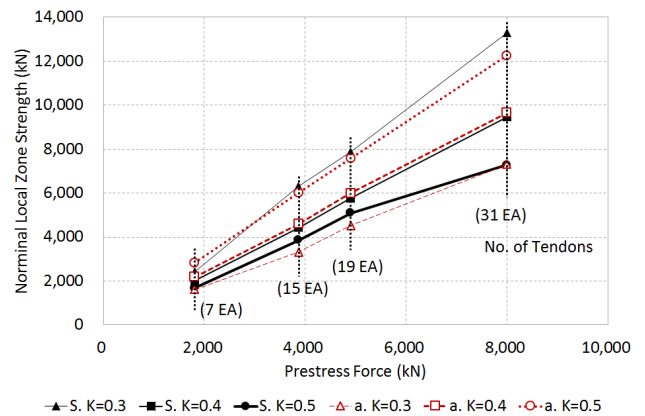
Fig. 10에 나타낸 바와 같이 사각형 정착판 설계에서 형상계수  $K$ 가 0.4일 경우 허용강도를 초과하는 것으로 나타났으며, 0.5와 0.6의 경우 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 11에 나타낸 원형 정착판 설계에서 형상계수  $K$ 가 0.3일 경우 허용강도를 초과하는 것으로 나타났으며, 0.4와 0.5의 경우 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 10과 Fig. 11에 의해 형상계수  $K$ 는 사각형 정착판의 경우 0.5 이상, 원형 정착판의 경우 0.4 이상이어야 한다. 그러나 사각형 정착판과 원형 정착판의 형상계수 0.5와 0.4를 초과할 경우 이미 안전이 확보된 정착구의 중량이 증가되어 시공성과 경제성이 저하될 수 있다. 따라서 사각형 정착판과 원형 정착판의 형상계수  $K$ 는 각각 0.5 및 0.4로 결정할 수 있다.



**Fig. 10** Nominal Local Zone Strength of Basic Bearing Plate according to Prestressing Force



**Fig. 11** Nominal Local Zone Strength of Special Bearing Plate according to Prestressing Force

### 4.3 제안식 검토

제안식을 검증하기 위해 형상계수  $K$ 에 대한  $A_g/A_c$ 를 도로교설계기준(2010)에 의한 제안식에 적용하여 비교하였다. 이때, 기존 제품의 제원을 이용하여 검토한 결과를 함께 나타내었다.

사각형 정착판과 원형 정착판 형상계수  $K$ 에 대한  $A_g/A_c$ 는 Table 2에 언급한 바와 같이 각각 0.2, 0.15이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 사각형 정착판과 원형 정착판에 대한 제안식을 기존 제품의 제원과 도로교설계기준(2010)에 의한 식과 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 12와 Fig. 13에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 제안식으로 설계된 정착판 보다 도로교설계기준(2010)에 의한 제안식으로 설계된 정착판이 큰 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 도로교설계기준(2010)의 경우 하중계수 및 강도감소계수를 적용하였기 때문이다. 즉, 도로교설계기준(2010)에 의한 제안식을 적용할 경우 안전한 설계는 가능하지만, 정착

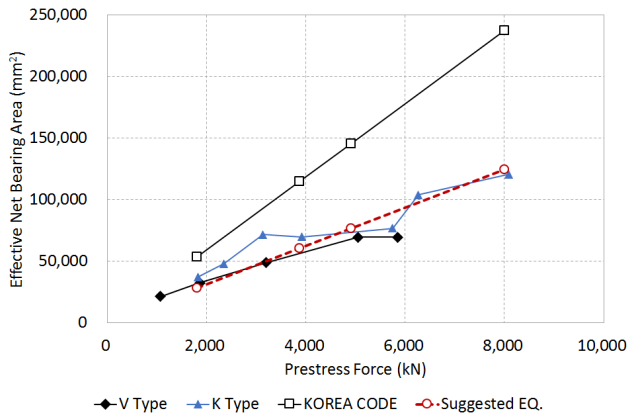


Fig. 12 Comparison between Designed Basic Bearing Plate and Other Anchorage Type

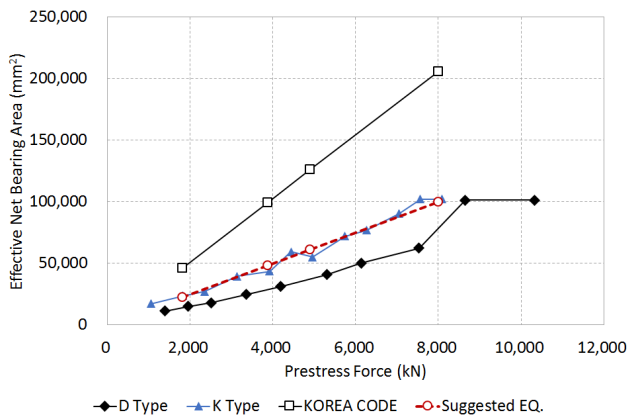


Fig. 13 Comparison between Designed Special Bearing Plate and Other Anchorage Type

구역의 안전을 확보한 후 정착구 중량을 감소시켜 시공성을 향상시키기 위해서는 본 연구의 제안식이 합리적일 것으로 판단된다. 또한, Fig. 12에서는 본 연구의 제안식은 기존 제품들과 거의 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 13에서는 기존 제품인 K Type의 경우 본 연구의 제안식과 거의 일치하게 나타났으나 D Type의 경우 본 연구의 제안식 보다 정착판의 유효면적이 작은 것으로 나타났다. 이는 D Type, K Type의 경우 원형 정착판과 리브를 갖고 있는 특수 정착구로써 리브에 의한 효과를 고려하여 정착판이 작게 설계된 것이며, K Type이 본 연구의 제안식과 거의 일치하는 것은 안전을 고려하여 정착판을 크게 설계된 것으로 판단된다.

이상의 분석으로 본 연구에서 제안한 식을 통해 리브가 없는 사각형 정착판과 원형 정착판의 기본적인 설계가 가능한 것으로 나타났으며, 사각형 정착판에 비하여 원형 정착판을 적용할 경우 정착판 및 콘크리트의 단면적을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구는 프리스트레스 하중에 따른 원형 정착판을 적용한 포스트텐션 특수 정착구의 기본 설계에 관한 연구로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 포스트텐션 공법의 특수 정착구를 설계하기 위한 제안식을 국내의 규정을 분석하여 제안하였으며, 유한요소해석에 의한 국소구역 검토 및 기존 제품들과의 비교분석을 통해 합리적인 설계가 가능한 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 제안한 제안식은 리브가 없는 사각형 정착판과 원형 정착판의 설계를 위한 제안식으로 정착판의 형상에 따라 형상계수를 적용하여야 하는데, 사각형 정착판과 원형 정착판의 형상계수는 각각 0.5, 0.4를 적용하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다.
- 3) 형상계수에 따른 최초  $A_g/A_c$ 는 사각형 정착판과 원형 정착판이 각각 0.2, 0.15이고, 정착판을 설계한 후 유한요소해석을 통해 국소구역의 응력분포를 분석한 후  $A_g/A_c$ 를 수정하여 콘크리트 단면을 결정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
- 4) 유한요소해석 분석 결과를 프리스트레스 하중에 의해 발생하는 국소구역은 정착구를 중심으로 동심원을 그리며 발생하였고, 국소구역의 응력분포로 볼 때 원형 정착구가 사각형 정착구보다 효율적인 것으로 나타났다.
- 5) 기존의 규정에는 국소구역을 기하학적으로 제안하고 있으나, 유한요소해석을 통해 확인하는 것이 보다 효율적임을 확인하였다.
- 6) 본 연구는 원형 정착판을 적용한 포스트텐션 특수 정착구의 기본 설계에 관한 것으로 설계단계임을 고려하여 선형 유한요소해석을 수행하였다. 또한 프리스트레스 하중에 의해 발생하는 국소구역을 확인하고 나선보강 철근을 설계하기 위해 나선보강 철근이 배근되지 않은 상태를 고려하여 해석을 수행하였다.
- 7) 본 연구는 유한요소해석을 기반으로 수행하였으므로 추후에 실험을 통한 검증연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20131520100720).

## References

- AASHTO (2014), LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, USA, pp.5-101~5-127.
- Breen, J. E., Burdet, O., Roberts, C., Sanders, D., and Wollmann, G. (1991), Anchorage Zone Reinforcement for Post Tensioned Concrete Girders, NCHRP, TX, USA, 40-41.
- Choi, K. H. (2013), Study on the Load Transfer Capacity of Circular Anchorage for Prestressed Concrete, Ph. D. Dissertation, The Sangji University, Wonju, KOR, 92-94.
- Korea Concrete Institute (2012), Concrete Structures Code Guidebook, Korea Concrete Institute, KOR, 276-280.
- Korean Institute of Bridge and Structural Engineers (2015), Highway Bridge Design Specification for Limit State Design, KOR, 5-214.
- Lim, D. H., Oh, B. H., and Kim, S. S. (1996), Anchorage Zone Design of Precast Prestressed Concrete Bridges, *Journal of Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 8(3), 218.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (2008), Highway Bridge Design Specification, KOR, 555-574.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (2010), Highway Bridge Design Specification, KOR, 4-133~4-146.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (2012), Highway Bridge Design Specification for Limit State Design, KOR, 5-143.
- Post-Tensioning Institute (1998), Acceptance Standards for Post-Tensioning System, PTI, USA, 18.
- Post-Tensioning Institute (2000), Anchorage Zone Design, PTI, USA, 4-9.
- Prestressed Concrete Committee (2014), Design and Construction Method for Prestressed Concrete Structures and Plant Structures, KCI, KOR, 37.
- Stone, W. C., Paes-Filho, W., and Breen, J. E. (1981), Behavior of Post-Tensioned Girder Anchorage Zone, The University of Texas at Austin, TX, USA, 77-80.

Received : 08/24/2016

Revised : 09/06/2016

Accepted : 09/20/2016

---

**요 지** : 포스트텐션 공법을 적용한 콘크리트 부재의 정착구역에서 정착판 근처의 지압응력은 일반적으로 높은 프리스트레스 하중에 의해 발생한다. 따라서 단면의 효율적인 활용과 콘크리트 부재의 파괴로 이어질 수 있는 균열제어를 위해 적절한 정착판의 크기가 제시되어야 한다. 본 연구에서는 도로교설계기준 및 PTI 등에 의해 사각형 정착판과 원형 정착판의 유효면적에 대한 관계식을 제안하였다. 또한 정착판의 형상에 따라 형상계수를 제안하였으며, 유한요소해석을 통해 적절성을 분석하였다.

**핵심용어** : 지압응력, 지압판 면적비, 형상계수, 국소구역, 특수 정착구

---