

## 2,400 MPa 강연선용 포스트텐션 정착구의 하중전달성능

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

### The Load Transfer Performance of Post-tension Anchorage with 2,400 MPa Strands

Sun-Woo Kim<sup>1</sup>, Byeong-Cheol Lho<sup>2\*</sup>, Jung-Hoon Lim<sup>3</sup>

**Abstract** : Strands with ultimate strength of 2,400 MPa was developed and applied in the KCI Code and the KS standard. A high-strength prestressed strand to be applied to a structure, a suitable anchorage system should be used together. Recently, a post tension anchorage for 2,400 MPa strands was developed. but there is not much research on performance evaluation. Therefore, in this study, structural analysis of local zone with 9 strands, 15 strands, and 19 strands anchorage were investigated respectively, which are most widely used for post tensioning anchorages with 2,400 MPa strands, according to PTI anchorage zone design method, and Load transfer performance from ETAG013 and/or KCI-PS101 was evaluated. Furthermore, the adequacy of the test was also analyzed by nonlinear numerical analysis. As results, the anchorages with 2,400 MPa strands satisfied the structural performance of the local area and satisfied the load transfer performance condition.

**Keywords**: 2,400 MPa strands, 2,400 MPa anchorage, Post-tension anchorage, Load transfer test, 3D nonlinear analysis

## 1. 서론

2,400 MPa의 인장강도를 갖는 강연선의 개발이 성공함에 따라 2011년 개정된 KS D 7002 규격에는 PC 강연선 중 7연선의 종류에 C종(SWPC7CL)과 D종(SWPC7DL)을 각각 추가한 바 있다. 콘크리트구조기준은 KS 규격을 만족하는 강연선을 사용하도록 규정하고 있으므로, 현시점에서 고강도 강연선의 구조물 적용이 가능하게 되었다(Park and Cho, 2012).

정착구 주변 콘크리트에는 프리스트레스 하중에 의하여 다양하고 높은 응력이 복잡하게 작용하므로, 적절한 정착판 설계가 이루어지지 않는다면 정착구역에 균열이 발생될 수 있고, 구조물의 파괴로 이어질 수도 있다(Choi et al, 2016). 따라서 고강도 PS 강연선을 구조물에 적용하기 위해서는 그에 적합한 정착시스템이 함께 사용되어야 한다.

정착장치의 성능평가기준은 전 세계적으로 미국의 PTI 기준이나 유럽의 ETAG013 기준이 통용되고 있으며, 국내에서는 2009년에 제정된 콘크리트표준시방서내에 관련 시험기준 KCI-PS101을 제정하여 적용하고 있다 (Kim et al, 2012).

또한 도로교설계기준 (2015)에는 강연선의 선정과 정착장

치의 위치 결정, 철근 보강, 긴장 순서를 포함한 전반적인 설계와 시공에 관련된 상세 사항은 설계 도면으로 작성하여 시공 전 공사 책임자의 승인을 받도록 규정되어 있다(KIBSE, 2015).

기존 연구 및 문헌에서 언급된 바와 같이 고강도 강연선을 적용하기 위해서는 적절한 정착시스템이 사용되어야 하고, 이에 대한 객관적이며 정량적인 분석이 필요하다. 그러나 2,400 MPa 정착구에 대한 하중전달성능 분석에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2,400 MPa 강연선을 구조물에 적용하기 위한 정착구에 대하여 ETAG013 및 KCI-PS101에 의한 하중전달성능시험을 수행하고, 범용구조해석 프로그램인 MIDAS FEA를 이용한 3차원 비선형 해석의 비교-분석을 통하여 정착구역의 거동을 분석하였다.

## 2. 2,400 MPa 정착구의 구조 및 하중전달성능

### 2.1 2,400 MPa 정착구의 구조성능

포스트텐션 정착구는 기본 정착구와 특수 정착구로 구분하며, 기본 정착구는 특정범위에 있는 사각형 정착판을 적용한 정착구이고, 기본 정착구의 형태에서 벗어난 정착구는 특수 정착구로 분류한다(PTI, 2000).

2,400 MPa의 고강도 강연선을 적용하는 정착구는 특수 정

<sup>1</sup>정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 공학석사

<sup>2</sup>중신회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

<sup>3</sup>정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 박사과정

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

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

착구로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 강연선으로부터 전달되는 프리스트레스 힘을 지지하는 정착판과 횡방향 리브 및 종방향 리브가 설치되어있다.

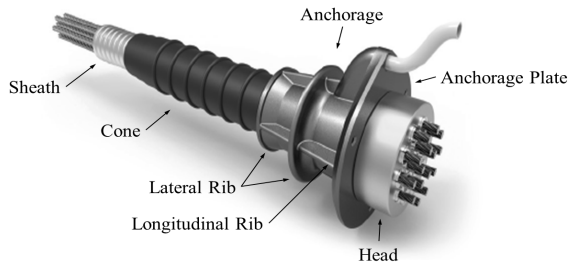


Fig. 1 Anchorage System for 2,400 MPa Strands

기본 정착구에 대한 국내 설계규정은 도로교설계기준 등에, 해외 설계규정은 PTI에서 발간한 Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems (1998), AASHTO에서 발간한 Standard Specification for Highway Bridges (2002) 등에 명시되어있다(Prestressed Concrete Committee, 2014).

특수 정착구에 대해서는 PTI의 Anchorage Zone Design (2000)에서 국소구역의 공칭하중  $P_n$ 을 규정하고 있다.  $P_n$ 은 식 (1)과 같이 구속된 콘크리트에 의한 하중  $P_c$ 와 국소구역 보강에 의한 하중  $P_s$ 의 합으로 제안하고 있다.

$$P_n = \eta(P_c + P_s) \leq 3f'_{ci}A_b \quad (1)$$

여기서,  $f'_{ci}$ 는 프리스트레스 도입 시 콘크리트 압축강도 (MPa)이고,  $A_b$ 는 정착판의 유효단면적 (mm<sup>2</sup>),  $\eta$ 는 수정계수로 범위가 0.85 ~ 0.95 이다. 또한, 콘크리트가 부담하는  $P_c$ 와 나선철근이 부담하는  $P_s$ 는 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$P_c = 0.8f'_{ci}A_b\sqrt{A/A_g} \leq 2f'_{ci}A_b \quad (2)$$

$$P_s = 4.1f_{lat}A_{core} \quad (3)$$

여기서,  $A$ 는 정착판을 지지하는 콘크리트 단면적 (mm<sup>2</sup>),  $A_g$ 는 정착판의 단면적 (mm<sup>2</sup>),  $f_{lat}$ 는 횡방향 구속 응력 (MPa),  $A_{core}$ 는 나선철근에 의해 구속된 콘크리트 심부 면적 (mm<sup>2</sup>) 이다.

한편, 식 (3)의  $f_{lat}$ 는 나선철근에 의한 횡방향 구속응력을 나타낸 것이고,  $A_{core}$ 는 나선철근에 의해 구속된 콘크리트의 단면적으로 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$f_{lat} = \frac{2A_s f_y}{D_s} \quad (4)$$

$$A_{core} = \frac{D^2\pi}{4} \left(1 - \frac{s}{D}\right)^2 - A_{duct} \quad (5)$$

여기서,  $A_s$ 는 나선철근의 단면적 (mm<sup>2</sup>),  $f_y$ 는 나선철근의 항복강도 (MPa),  $D$ 는 나선철근의 나선 지름 (mm),  $s$ 는 나선철근의 간격 (mm),  $A_{duct}$ 는 덕트의 단면적 (mm<sup>2</sup>)이다.

본 연구에서는 2,400 MPa 강연선을 9 가닥, 15 가닥, 19 가닥 사용하는 정착구에 대하여 분석을 수행하였고 주요 제원은 Table 1과 같다. 사용된 콘크리트의 강도는 40 MPa 이지만, 프리스트레스 도입 시 강도를 고려하여 80 % 인 32 MPa로 결정하였다. 나선철근은  $f_y$ 가 400 MPa인 D16철근을 사용하였으며, 간격은 모두 50 mm 이다.

Table 1 Dimension of Anchorage System (unit : mm)

Index	Anchorage Diameter		Concrete Section	Spiral Diameter
	outside	Inside		
OH6/9	230	125	325×325	250
OH6/15	295	154	430×430	350
OH6/19	335	180	480×480	410

식 (4)와 (5)의  $f_{lat}$ 와  $A_{core}$ 에 의해 계산된  $P_s$ 를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 의하면 강연선 가닥수가 증가할수록 정착구 크기가 증가하므로 나선철근의 나선지름이 증가하여  $f_{lat}$ 는 감소하고,  $A_{core}$ 는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시공의 편의를 위해 나선철근을 D16으로 통일 하였기에 상대적으로 횡방향 구속응력이 감소한 것이다. 그러나  $f_{lat}$ 의 감소율보다  $A_{core}$ 의 증가율이 커서  $P_s$ 는 증가하는 것으로 나타났다.

Table 2 Calculated  $P_s$

Index	$f_{lat}$ (MPa)	$A_{core}$ (mm <sup>2</sup> )	$P_s$ (kN)
OH6/9	12.7	24,178	1,262
OH6/15	9.1	58,414	2,178
OH6/19	7.8	88,514	2,818

Table 3은 콘크리트가 부담하는 하중  $P_c$ 를 나타낸 것으로 정착구 크기가 증가할수록 콘크리트와 정착판의 면적이 증가하여  $P_c$ 가 증가하는 것으로 나타났다.

Table 4는 Table 2와 3의 결과를 종합하여 계산된  $P_n$ 을 나타낸 것으로 이미 식 (1)에 언급한 바와 같이  $P_n$ 은  $3f'_{ci}A_b$ 이하여야 한다. 본 연구대상의 정착구는 Table 4에 나타난 바와 같이 PTI에서 제안하고 있는 정착구의 구조성능을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

**Table 3** Calculated  $P_c$

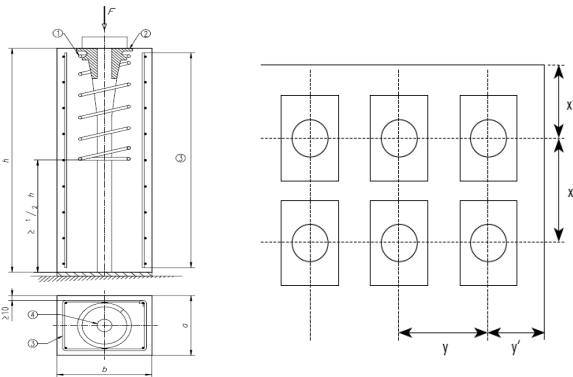
Index	$A_b$ (mm <sup>2</sup> )	$P_c$ (kN)	$2f_{ci}' A_b$ (kN)	Evaluation
OH6/9	62,102	2,246	3,974	O.K.
OH6/15	95,148	3,550	6,089	O.K.
OH6/19	127,482	4,676	8,158	O.K.

**Table 4** Calculated  $P_n$

Index	$P_c$ (kN)	$P_s$ (kN)	$P_n$ (kN)	$3f_{ci}' A_b$ (kN)	Evaluation
OH6/9	2,246	1,262	3,158	5,961	O.K.
OH6/15	3,550	2,178	5,156	9,134	O.K.
OH6/19	4,676	2,818	6,745	12,238	O.K.

**2.2 2,400 MPa 정착구 구조 및 하중전달성능평가**

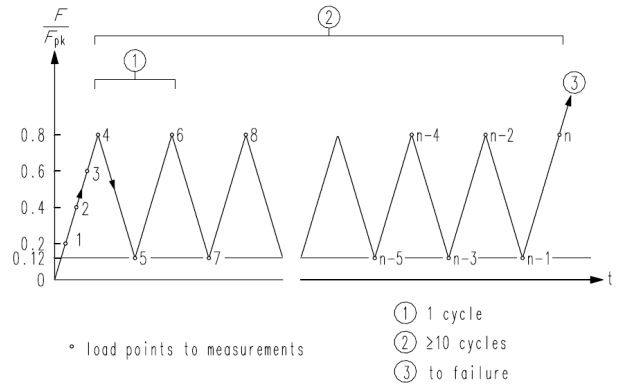
Fig. 2는 ETAG013 및 KCI-PS101에서 제안한 시편의 표준도와 정착구 중심간 거리를 나타낸 것으로 단면 길이를  $a$ , 정착구의 중심간 거리를  $x, y$ 라 할 때, 식 (6)과 같은 조건을 만족하도록 규정하고 있다.



**Fig. 2** Standard Drawing of Load Transfer and Central Distance of Anchorage

$$x \geq 0.85a, \quad y \leq 1.15b \quad (6)$$

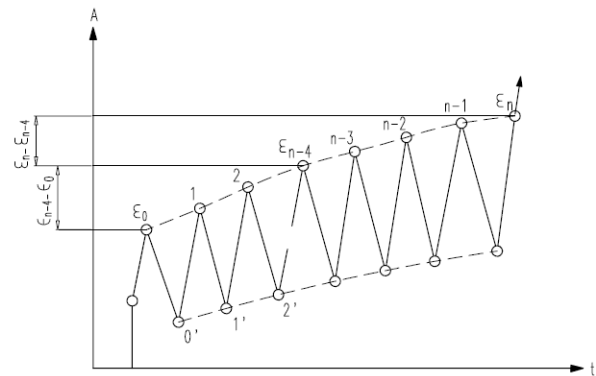
Fig. 3은 하중전달시험의 하중재하방법을 나타낸 것으로 ① 구간으로 표시된 것과 같이 첫 번째 하중 재하시 정착구에 재하되는 프리스트레스 하중의 20, 40, 60, 80%를 단계적으로 재하한 후 12%까지 감소시킨다. 그 후 ② 구간으로 표시된 것과 같이 2회부터 10회까지 프리스트레스 하중의 80%까지 증가와 12%까지의 감소를 반복수행 한다. 10회 반복재하 완료 후 ③에 나타난 바와 같이 시편 파괴 시까지 재하한다.



**Fig. 3** Load Control of Load Transfer Test

하중전달성능평가는 제안된 파괴하중과 안정성 조건을 만족하도록 규정하고 있다. 즉, 파괴하중은 Fig. 3의 하중재하 후 프리스트레스 하중의 110% 이상에서 파괴되어야 한다. 안정성은 반복하중에 대한 변형률의 변화를 통해 하중전달 정착구역의 안정성을 평가할 수 있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 10회 이상의 반복하중에 의해 발생된 수평 및 수직 변형률은 식 (7)을 만족하여야 한다. 식 (7)에 의하면 반복하중 구간  $\epsilon_{n-4} - \epsilon_0$ 의 변형률 차이가  $\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$ 의 변형률 차이 보다 1/3 이하가 되도록 제한하고 있으며 여기서,  $n$ 은 하중재하 반복 횟수이다.

$$\epsilon_n - \epsilon_{n-4} \leq 1/3(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0) \quad (7)$$



**Fig. 4** Stability Criteria by Strain

**2.3 비선형 수치해석**

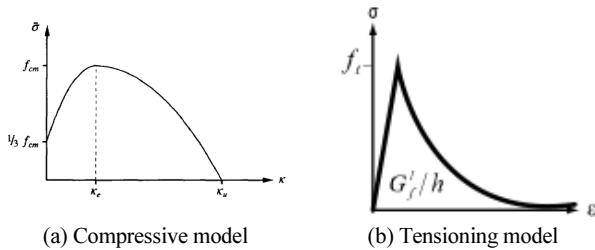
하중전달시험에 의한 정착구역의 거동을 이론적으로 분석하기 위하여 범용구조해석 프로그램인 MIDAS FEA를 이용하여 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 재료 특성은 Table 5에 나타난 바와 같이 하중전달시편과 동일하게 설정하였다.

**Table 5** Properties of Material

Index	Concrete	Anchorage	Head
Strength [MPa]	32	295	747
Elastic Modulus [MPa]	28,067	97,000	200,000
Poisson's ratio	0.167	0.25	0.25

수치해석 모델은 입체 요소 중 육면체 요소를 사용하여 MIDAS FEA에서 제공하는 전변형률 균열 모델(total strain crack model)을 적용하였다. 전변형률 균열 모델은 고정균열 모델과 분산회전균열 모델로 나눌 수 있는데, 이 두 모델은 일반적인 철근 콘크리트 구조물의 균열 거동 모사에 탁월한 것으로 알려져 있으며, 특히 고정균열모델은 콘크리트 균열의 물리적인 거동을 적절히 모사하고 있는 것으로 평가받고 있다(MIDASIT,2008).

Fig. 5는 비선형의 재료모델을 나타낸 것으로 압축 모델은 전변형률 모델에서 제공하고 있는 포물선 모델 (Parabolic Model)을 적용하였으며, 인장 모델은 Hordijk 모델을 적용하였다.

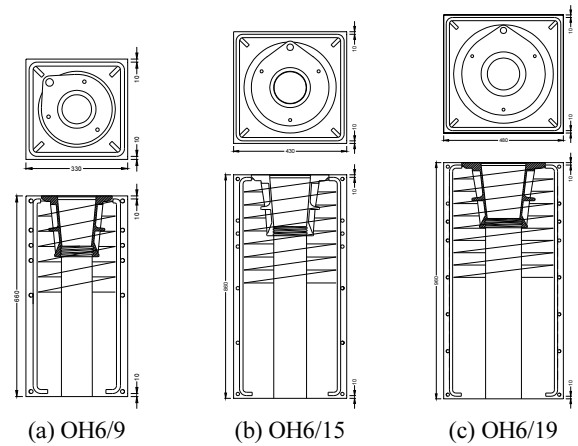


**Fig. 5** Material Model for Nonlinear Analysis

### 3. 2400 MP $\alpha$ 정착구의 하중전달성능평가

#### 3.1 시험방법

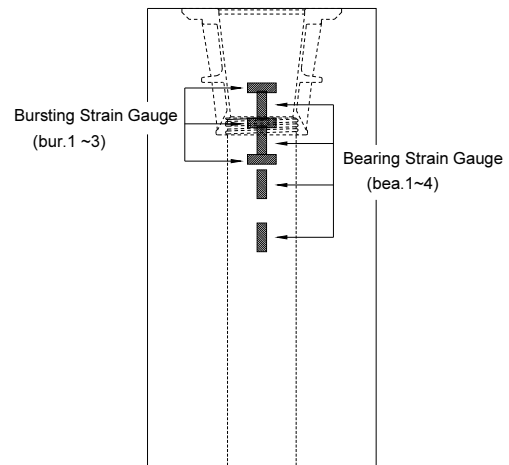
하중전달시험은 ETAG013 및 KCI-PS101에 근거하여 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 OH6/9, OH6/15, OH6/19를 각각 330×330×660 mm, 430×430×860 mm, 480×480×960 mm 크기로 제작하였다. 또한 하중전달시험을 위해 Table 6에 나타낸 바와 같이 하중, 변위 및 변형률 측정센서를 설치하였고, 변형률 측정센서 위치는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다.



**Fig. 6** Drawings of Load Transfer Test Specimen

**Table 6** Index of Gauge

Ch. No.	ID	Object of Measurement	Gauge Type
0	load	loading	actuator load cell
1	disp.	vertical displacement	LVDT
2~4	bea.1~3	bearing strain	strain gauge
6~8	bur.1~3	bursting strain	strain gauge



**Fig. 7** Location of Concrete Strain Gauge

하중전달시험은 OH6/19 시편의 경우 5,000 kN용량의 압축시험기를 이용하여 가압하였고, OH6/15와 OH6/19 시편의 경우 가압하중이 상대적으로 커서 30,000 kN 용량의 압축시험기를 이용하여 가압하였다. 모든 시험은 ETAG 013 및 KCI-PS101에 근거하여 10회 반복재하를 수행하였으며, 각 하중단계의 처짐 및 변형률을 측정하였다. Fig. 9는 30,000 kN 용량의 압축시험기에 의한 시험 전경을 나타낸 것이다.



Fig. 8 Load Transfer Test (30,000 kN)

### 3.2 시험결과

#### 3.2.1 파괴하중에 따른 안전성

Fig. 10 ~ 12는 하중-처짐 곡선을 나타낸 것으로 반복하중이 재하되는 동안에는 거의 선형적인 거동을 나타내었다. 또한 10 회 반복 후 비선형 거동이 나타나며, 정착구역에서부터 파괴가 발생하였다.

OH6/9 시편의 경우, 재하하중이  $1.1F_{pk}$ 를 초과한 3,300 kN에서도 계속적인 증가추세를 나타내었으며, 시험 중 안전을 고려하여 3,600 kN까지만 재하 하였다.

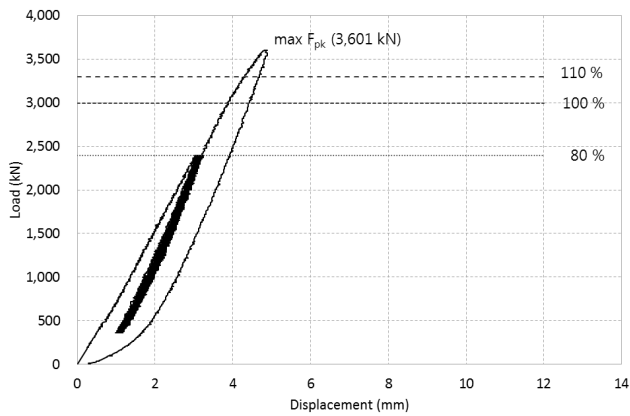


Fig. 9 Load-Deflection Curve (OH6/9)

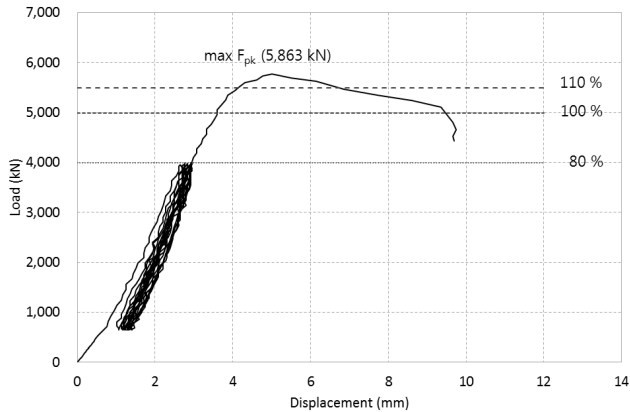


Fig. 10 Load-Deflection Curve (OH6/15)

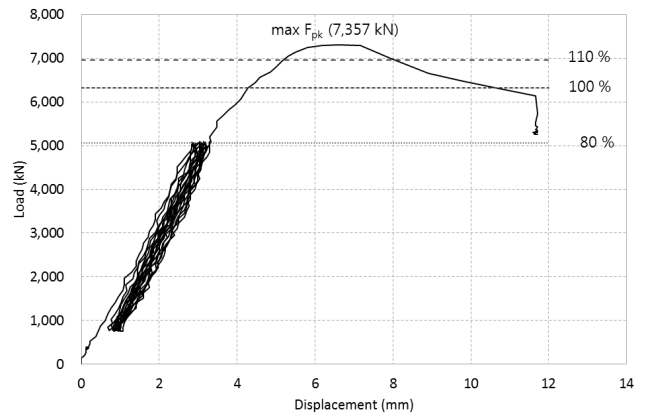


Fig. 11 Load-Deflection Curve (OH6/19)

Fig. 13~15는 재하 시간에 따른 하중을 나타낸 것으로, ETAG013 및 KCI PS-101에 근거하여 Fig. 3에 언급한 바와 같이 하중재하를 하였다.

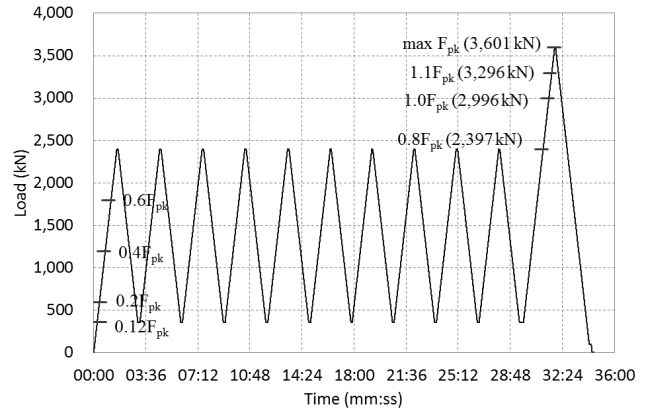


Fig. 12 Loading according to Time (OH6/9)

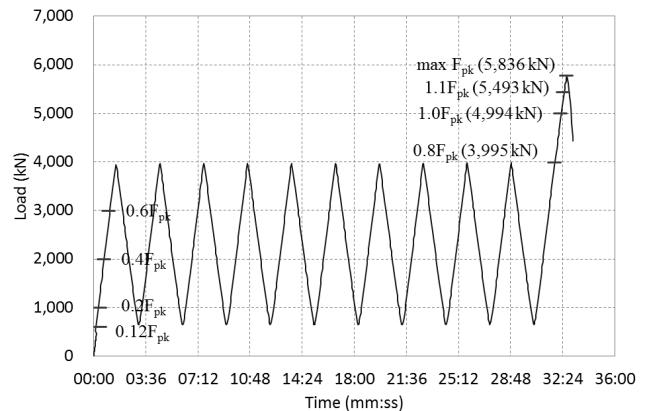


Fig. 13 Loading according to Time (OH6/15)

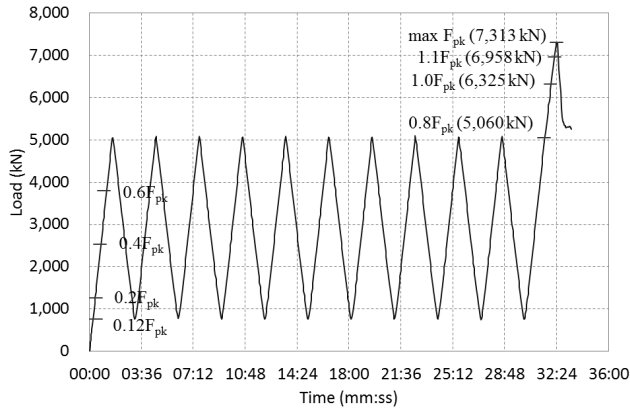


Fig. 14 Loading according to Time (OH6/19)

Table 7은 이상의 실험결과를 나타낸 것으로 10회 반복하중 재하 후 마지막 하중 재하 시 OH6/9, OH6/15, OH6/19의 파괴하중은 각각 3,601 kN, 5,836 kN, 7,357 kN 으로 나타나, 모든 정착구의 파괴하중이 1.1F<sub>pk</sub>를 초과하여 ETAG013 및 KCI PS-101의 파괴하중 규정을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 7 Results of Test

Index	OH6/9	OH6/15	OH6/19
Breaking Load [kN]	3,601	5,836	7,357
Maximum Load ( 1.1F <sub>pk</sub> ) [kN]	3,296	5,493	6,958
Nominal Strength ( 1.0F <sub>pk</sub> ) [kN]	2,996	4,994	6,325
Safety Factor	1.09	1.06	1.06

### 3.2.2 변형률에 의한 안정성

Fig. 16 ~ 18은 ETAG013 및 KCI-PS101에서 제안한 반복하중에 따른 수직 변형률을 시간의 경과에 따라 나타낸 것으로 하중이 재하되는 동안 이상 변형은 발생하지 않은 것으로 나타났다. 측정된 변형률 중  $\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$ 은 OH6/9의 경우, 1  $\mu\epsilon$ , 1  $\mu\epsilon$ , 1  $\mu\epsilon$ , 5  $\mu\epsilon$ , OH6/15의 경우 9  $\mu\epsilon$ , 17  $\mu\epsilon$ , 18  $\mu\epsilon$ , 26  $\mu\epsilon$ , OH6/19의 경우 1  $\mu\epsilon$ , 4  $\mu\epsilon$ , 9  $\mu\epsilon$ , 15  $\mu\epsilon$ 로 나타났으며,  $1/3(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0)$ 의 값은 OH6/9의 경우, 1.3  $\mu\epsilon$ , 3.0  $\mu\epsilon$ , 1.3  $\mu\epsilon$ , 5.7  $\mu\epsilon$ , OH6/15의 경우 28.3  $\mu\epsilon$ , 29.0  $\mu\epsilon$ , 48.3  $\mu\epsilon$ , 44.3  $\mu\epsilon$ , OH6/19의 경우 1.3  $\mu\epsilon$ , 7.3  $\mu\epsilon$ , 12.7  $\mu\epsilon$ , 22.3  $\mu\epsilon$ 로 계산되었다. Table 8은 각 시편의  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_{n-4}$ ,  $\epsilon_n$  및 수직 변형률에 의한 안정성 평가 결과를 나타낸 것이다.

따라서 이미 언급한 식 (2)에 의해 계산된  $\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$ 은 모두  $1/3(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0)$  이하로 나타나 변형률의 안정성이 확보된 것을 알 수 있었다.

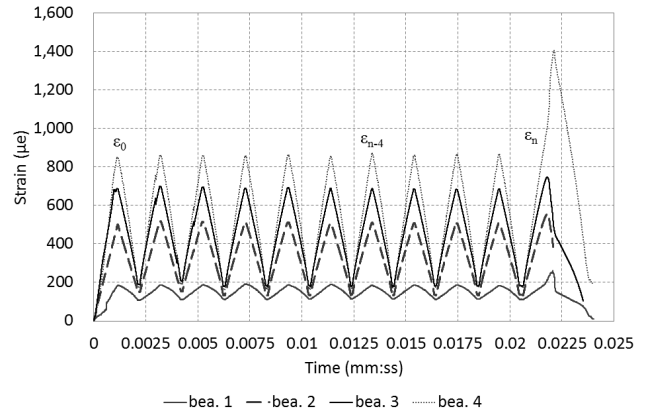


Fig. 15 Bearing Strains according to Time (OH6/9)

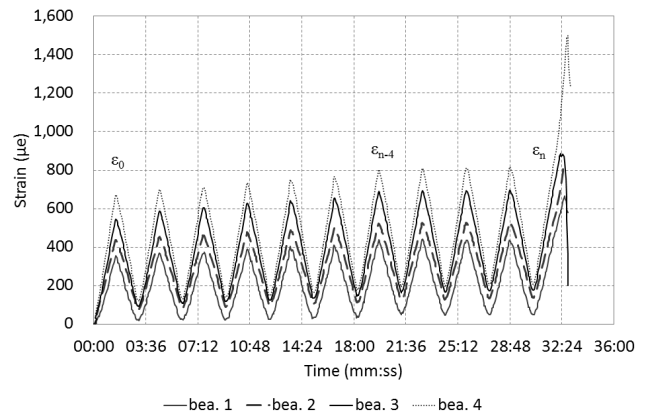


Fig. 16 Bearing Strains according to Time (OH6/15)

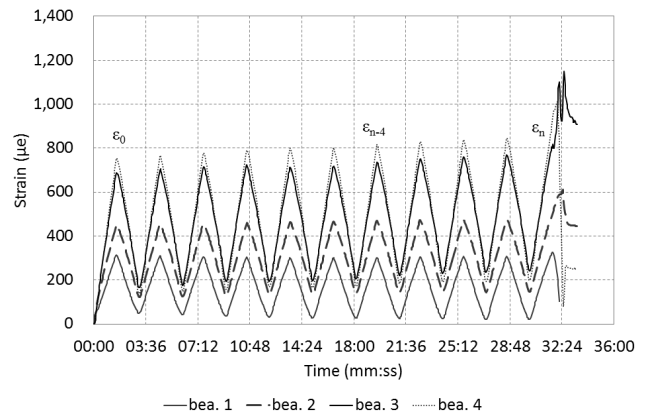
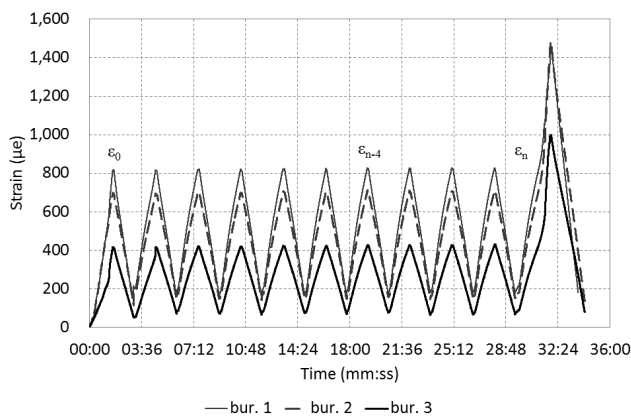


Fig. 17 Bearing Strains according to Time (OH6/19)

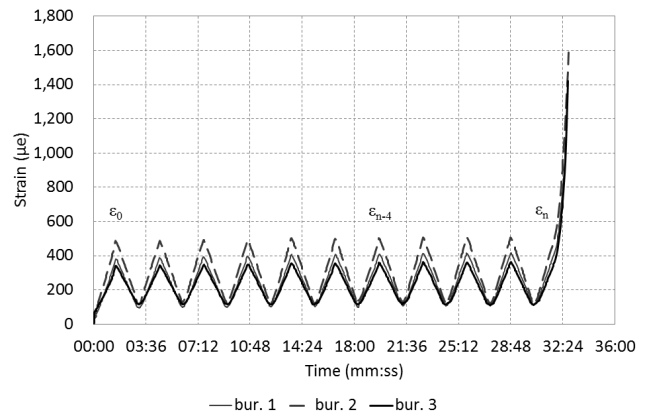
**Table 8** Stability Evaluation of Bearing Strains

Index	$\epsilon_n$	$\epsilon_{n-4}$	$\epsilon_0$	$\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$	$\epsilon_{n-4} - \epsilon_0$	Eva.	
OH6/9	bea.1	186	185	181	1	4	O.K
	bea.2	510	509	500	1	9	O.K
	bea.3	688	687	683	1	4	O.K
	bea.4	874	869	852	5	17	O.K
OH6/15	bea.1	448	439	354	9	85	O.K
	bea.2	540	523	436	17	87	O.K
	bea.3	707	689	544	18	145	O.K
	bea.4	830	804	671	26	133	O.K
OH6/19	bea.1	314	313	309	1	4	O.K
	bea.2	474	470	448	4	22	O.K
	bea.3	744	735	697	9	38	O.K
	bea.4	833	818	751	15	67	O.K

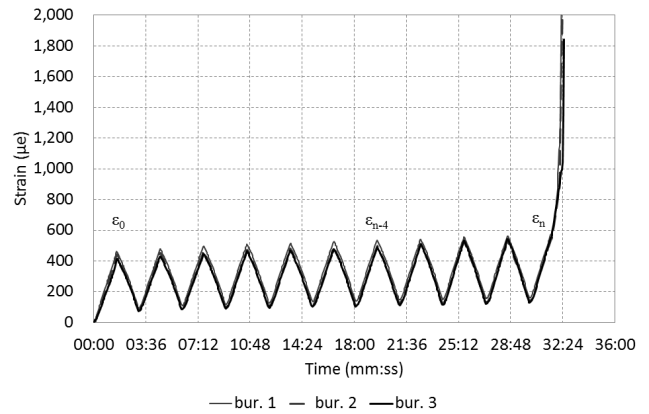
수평 변형률의 안정성 평가를 위해 수직 변형률과 같이 Fig. 19 ~ 20에 나타내었으며, 각각의 변형률에서  $\epsilon_0, \epsilon_{n-4}, \epsilon_n$ 을 확인하였다. Table 9는 수평 변형률의 안정성 평가를 나타낸 것으로  $\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$ 은 OH6/9의 경우,  $2 \mu\epsilon, 4 \mu\epsilon, 3 \mu\epsilon$ , OH6/15의 경우  $8 \mu\epsilon, 3 \mu\epsilon, 3 \mu\epsilon$ , OH6/19의 경우  $4 \mu\epsilon, 6 \mu\epsilon, 71 \mu\epsilon$ 로 계산되었다.  $1/3(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0)$ 은 OH6/9의 경우,  $3.3 \mu\epsilon, 4.3 \mu\epsilon, 3.7 \mu\epsilon$ , OH6/15의 경우  $9.7 \mu\epsilon, 4.3 \mu\epsilon, 3.7 \mu\epsilon$ , OH6/19의 경우  $6.3 \mu\epsilon, 6.3 \mu\epsilon, 24.3 \mu\epsilon$ 로 계산되었다. 계산된  $\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$ 은 모두  $1/3(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0)$  이하로 나타나 변형률의 안정성이 확보된 것을 알 수 있었다.



**Fig. 18** Bursting Strains according to Time (OH6/9)



**Fig. 19** Bursting Strains according to Time (OH6/15)



**Fig. 20** Bursting Strains according to Time (OH6/19)

**Table 9** Stability Evaluation of Bursting Strain

Index	$\epsilon_n$	$\epsilon_{n-4}$	$\epsilon_0$	$\epsilon_n - \epsilon_{n-4}$	$\epsilon_{n-4} - \epsilon_0$	S.F	
OH6/9	bur.1	828	826	816	2	10	O.K
	bur.3	709	705	692	4	13	O.K
	bur.3	427	424	413	3	11	O.K
OH6/15	bur.1	418	410	381	8	29	O.K
	bur.2	505	502	482	3	20	O.K
	bur.3	362	359	340	3	19	O.K
OH6/19	bur.1	575	571	552	4	19	O.K
	bur.2	540	534	512	6	22	O.K
	bur.3	507	486	413	21	73	O.K

## 4. 2,400 MPa 정착구의 수치해석 및 비교·분석

### 4.1 2,400 MPa 정착구의 수치해석 모델링 및 결과

이미 언급한 바와 같이 정착구의 수치해석은 육면체 요소를 사용하였고 콘크리트, 정착구, 헤드를 각각 모델링 하였다.

효율적인 해석을 위해 1/4 모델링을 수행하였으며, 각각의 요소는 하중전달시편과 동일한 조건으로 적용하였다. Fig. 22는 정착구 OH6/9의 모델링과 해석결과를 나타낸 것이다. OH6/15 및 OH6/19도 동일한 방법으로 모델링을 하였으며, 최종 값만 다를 뿐 유사한 경향의 결과를 얻었다.

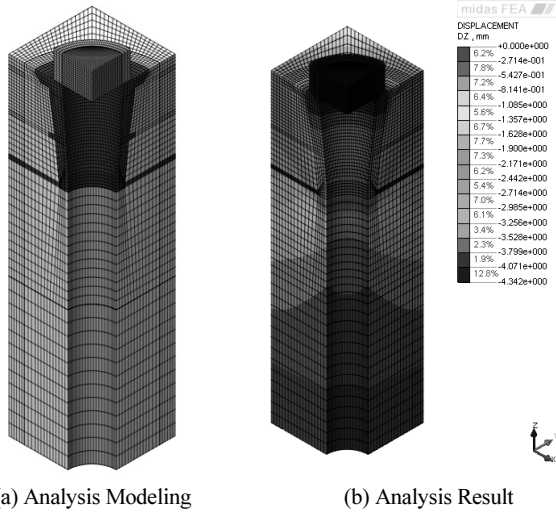


Fig. 21 Modeling and Analysis Results of Load Transfer Specimen

Fig. 23~25는 정착구의 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험 결과에 의한 최대 하중은 OH6/9, OH6/15, OH6/19는 각각 3,601 kN, 5,836 kN, 7,357 kN으로 나타났으며, 해석에 의한 최대 하중은 3,672 kN, 5,602 kN, 7,262 kN으로 나타나 유사한 경향을 나타내었기에 적절한 재하시험이 이루어진 것으로 판단된다.

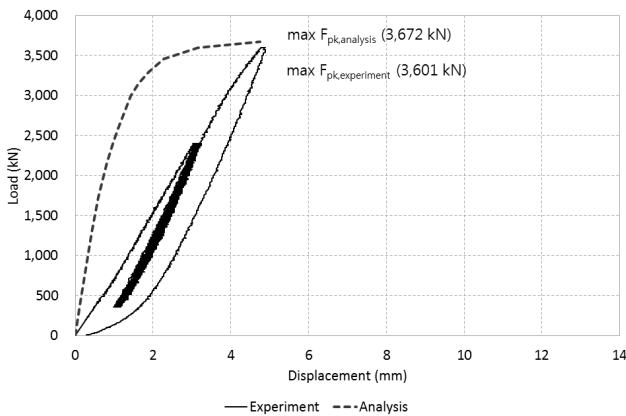


Fig. 22 Load-Deflection Curves of Experiment and Analysis (OH6/9)

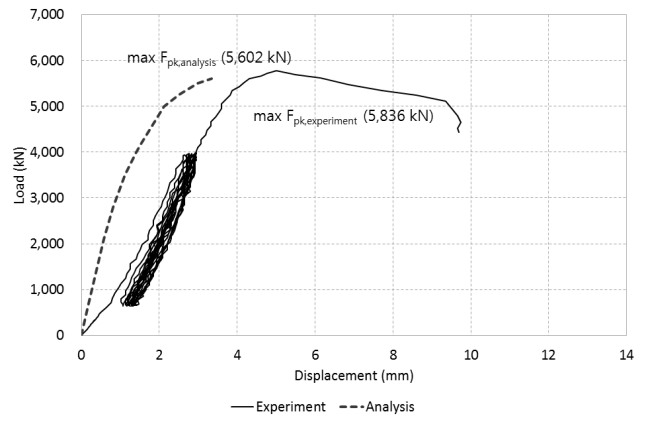


Fig. 23 Load-Deflection Curve of Experiment and Analysis (OH6/15)

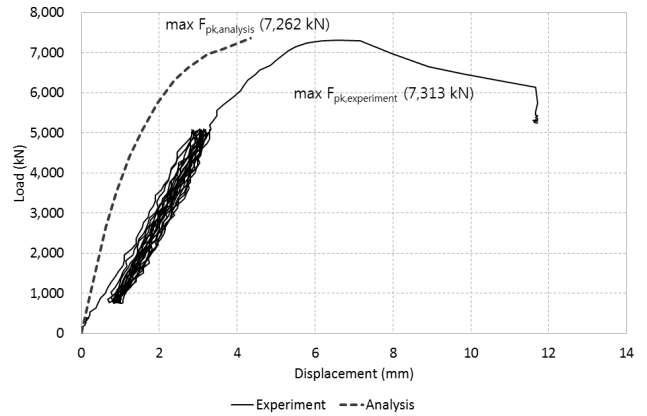


Fig. 24 Load-Deflection Curve of Experiment and Analysis (OH6/19)

## 5. 결론

본 연구는 2,400 MPa 정착구의 하중전달성능에 관한 연구로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구 대상의 2,400 MPa 정착구는 국내·외 포스트텐션 정착구 규정에 의해 특수 정착구로 정의되며, PTI의 Anchorage Zone Design (2000)에 의한 구조성능을 검토하였다. 국소구역의 공칭하중  $P_n$ 은 OH6/9, OH6/15, OH6/19가 각각 3,158 kN, 5,156 kN, 6,745 kN으로 계산되었으며,  $3f_{ci}'A_b$ 는 각각 5,961 kN, 9,134 kN, 12,238 kN으로 나타나 PTI에 의한 구조성능을 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) ETAG013 및 KCI-PS101에 의한 하중전달시험을 실시하였으며, OH6/9, OH6/15, OH6/19는  $1.1F_{pk}$ 를 초과한 3,601 kN, 5,836 kN, 7,313 kN에서 파괴되어 하중 조건을 만족하는 것으로 나타났다.



- 3) 하중조건 뿐 아니라 변형률에 의한 안정화 조건을 만족하는 것으로 나타나 OH6/9, OH6/15, OH6/19는 모두 하중전달성능을 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 3차원 비선형 해석을 수행한 결과 하중전달시험에 의한 하중-처짐 곡선과 유사한 경향을 나타내어 적절한 시험이 수행된 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 ㈜한국피씨에스의 연구지원으로 수행된 연구이며, 지원해주신 관계자분들께 깊은 감사드립니다.

## References

- Choi, K. H., Lho, B. C., and Lim, J. H. (2016), A Study on the Design of Special Circular Plate Anchorage for Post-tension, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(6), 73-83.
- Kim, J. K., Seong, T. R., and Lee, J. K. (2012), Development of 2,160 MPa/2,400 MPa PS Strand and its Application Technology, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 24(3), 45-50.
- Korean Institute of Bridge and Structural Engineers (2015), *Highway Bridge Design Specification for Limit State Design*, KOR, 5-214.
- Park, H. and Cho, J. Y. (2012), Flexural Analysis of Posttensioned Prestressed Concrete Beam with 2,160 MPa and 2,400 MPa Prestressing Strands, *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, The Korean Society for Railway, 1278-1283.
- 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.
- Received : 07/17/2018  
 Revised : 10/22/2018  
 Accepted : 10/29/2018

---

**요 지 :** 인장강도가 2,400 MPa인 강연선이 개발되어 콘크리트구조기준 및 KS 규격에 반영되었다. 고강도 프리스트레스트 강연선이 구조물에 적용되기 위해서는 그에 적합한 정착시스템이 함께 사용되어야 한다. 최근에 2,400 MPa 강연선 적용을 위한 포스트텐션 정착구의 개발이 진행되어왔으나, 성능평가에 대한 연구가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2,400 MPa 강연선을 적용한 포스트텐션 정착구 중 가장 활용도가 높은 9 가닥, 15 가닥, 19 가닥 정착구에 대하여 PTI의 Anchorage Design Zone에 의한 국소구역 구조검토를 실시하였고, ETAG013 및 KCI-PS101에 의한 하중전달성능평가를 수행하였다. 또한 비선형 수치해석을 통해 시험의 적절성을 분석하였다. 그 결과, 2,400 MPa 정착구는 국소구역의 구조성능을 만족하고, 하중전달성능 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 2,400 MPa 강연선, 2,400 MPa 정착구, 포스트텐션 정착구, 하중전달시험, 3차원 비선형 해석

---