

# 2400MPa 단일 강연선이 적용된 포스트텐션 정착 구역 설계에 대한 실험적 연구

## Experimental Analysis of Anchorage Zone Design for Unbonded Post-Tensioned Concrete Beam With 2400MPa Single Tendons

문 상 필\*  
Moon, Sang Pil

노 경 민\*\*  
Ro, Kyong Min

김 민 숙\*\*\*  
Kim, Min Sook

이 영 학\*\*\*\*  
Lee, Young Hak

### Abstract

In this study, the design of anchorage zone for unbonded post-tensioned concrete beam with single tendons of ultimate strength 2400MPa was evaluated to verify that the KDS 14 20 60(2016) and KHBDC 2010 codes are applicable. The experimental results showed that the bursting force equation of current design codes underestimated bursting stress measured by test, because the KDS 14 20 60(2016) and KHBDC 2010 propose the location of the maximum bursting force 0.5h which is the half of the height of member regardless of stress contribution. Although the allowable bearing force calculated by current design codes was not satisfied the prestressing force, the cracks and failure in anchorage zone was not observed due to the strengthening effect of anchorage zone reinforcement.

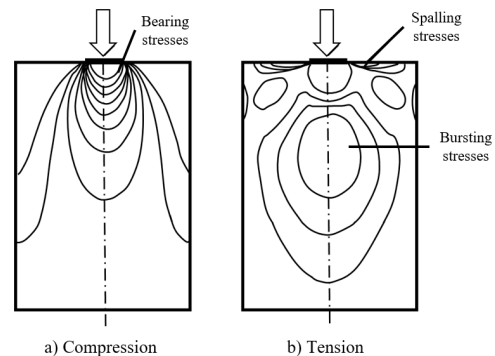
**Keywords :** Bursting force, Bearing force, Post-tensioning, Anchorage zone, High-strength tendon

### 1. 서론

포스트텐션 공법은 긴장력이 단부의 정착구를 통해 콘크리트로 전달되어 정착구로부터 집중 하중이 작용하게 된다. 이러한 집중 하중은 <Fig. 1>과 같이 정착 구역에서 좌절 응력, 지압 응력, 활렬 응력 등 복잡한 응력 교란을 발생시킨다.

구조 부재의 고강도화에 따라 프리스트레스트 콘크리트 공법에서 사용되던 1,860MPa 강연선보다 높은 인장 강도를 가지는 2,400MPa 강연선이 사용되고 있다. 고강도 강연선이 사용되면서 긴장력의 크기가 증가하여 정착구에는 더 큰 집중 하중이 발생되지만 현재 프리스트레스트 콘크리트 부재의 구조 설계에 적용되는 설계 기

준인 KDS 14 20 60<sup>1)</sup>과 도로교설계기준(KHBDC 2010)<sup>2)</sup>에는 강연선의 인장 강도에 따른 구분이 없다.



<Fig. 1> Stress contours for concentrically loaded anchorage zone

이러한 이유로 고강도 강연선을 사용할 경우 국내 설계 기준을 적용할 수 있는지에 대한 연구가 수행되었다. Park, Cho & Kim(2012)은 2,400MPa 강연선을 적용한 포스트텐션 거더에 대해 단면 해석을 수행하였다<sup>3)</sup>. 연구 결과, 현행 설계 기준에서 제시하고 있는 공칭 강도를 만족할 때 강연선의 인장 응력 산정식은 실험 결과를 과소평가하는 것으로 나타났다. Kim, Lho & Lim(2018)은

\* 학생회원, 경희대학교 건축공학과, 석사과정  
Architecture Engineering, Kyung Hee Univ.  
\*\* 학생회원, 경희대학교 건축공학과, 박사과정  
Architecture Engineering, Kyung Hee Univ.  
\*\*\* 정회원, 경희대학교 건축공학과 학술연구교수  
Architecture Engineering, Kyung Hee Univ.  
\*\*\*\* 교신저자, 정회원, 경희대학교 건축공학과 교수  
Architecture Engineering, Kyung Hee Univ.  
Tel: 031-201-3815 Fax: 031-204-3815  
E-mail: leeyh@khu.ac.kr

2,400MPa 강연선용 포스트텐션 정착구에 대하여 ETAG013 및 KCI-PS101에 의한 하중 전달 성능 시험을 수행하고 3차원 비선형 해석을 통하여 정착구의 성능을 검증하였다<sup>4)</sup>.

고강도 강연선의 적용 가능성에 관한 기존 연구는 대부분 강연선의 역학적 성질과 이를 적용할 수 있는 정착구의 성능 검증에 대한 것이다. 따라서 본 연구에서는 Lee, Cho & Kim(2018)<sup>5)</sup>에 의해 개발된 원형 정착구 및 사각 정착구를 사용한 2,400MPa 단일 강연선이 적용된 포스트텐션 콘크리트 부재의 구조 실험을 수행하였다. 이를 통해 고강도 강연선을 사용한 경우의 정착구역 설계에 대하여 KDS 구조설계기준과 도로교설계기준의 적용성을 평가하고자 한다.

## 2. 국내 설계 기준에 따른 정착 구역 설계

포스트텐션 정착 구역의 파괴는 주로 지압력이나 파열력에 의해 유발된다. 따라서 국내 설계 기준에서는 산정된 지압력과 파열력이 부재 내력을 초과하는 경우 콘크리트의 압축 강도를 증가시키거나 철근으로 보강하여 정착 구역의 파괴를 방지하도록 규정하고 있다.

### 2.1 프리스트레스트 콘크리트 구조 설계 기준 (KDS 14 20 60)에 따른 정착 구역 설계

KDS 구조설계기준에서는 식 (1) 및 식 (2)와 같이 파열력의 크기와 최대 파열력의 위치를 제시하고 있다.

$$F_{bst} = 0.25P(1 - \frac{a}{h}) \quad (1)$$

$$d_{bst} = 0.5(h - 2e) \quad (2)$$

여기서,  $F_{bst}$ 는 파열력,  $P$ 는 정착판에 작용하는 프리스트레스력,  $a$ 는 정착판의 높이,  $h$ 는 콘크리트 단면의 높이,  $d_{bst}$ 는 재하면에서부터 최대 파열력이 발생하는 위치까지의 거리,  $e$ 는 편심 거리를 나타낸다.

Mörsch(1924)가 제안한 스트럿-타이 모델을 기반으로 유도된 상기 파열력 산정식은 정착판에 작용하는 프리스트레스력이 상·하부면 정착판의 1/4 지점인 도심에서 발생하고, 이로 인한 콘크리트의 반력이 콘크리트의 단면의 1/4 지점인 도심에서 작용한다고 가정하였다. 이

때 단부에서 최대 파열력이 작용하는 위치까지의 거리를  $0.5h$ 로 제시하여 식 (3)과 같이 파열력을 산정하였다.

$$F_{bst} = \frac{P}{2} \tan\theta = \frac{P}{2} \frac{(h/4 - a/4)}{0.5h} = 0.25P(1 - \frac{a}{h}) \quad (3)$$

KDS 구조설계기준에서는 지압력에 대해 콘크리트의 설계 강도  $\phi P$ 가 계수 긴장력  $P_{pu}$  이상으로 설계하도록 규정하고 있다. 계수 긴장력과 설계 강도는 아래 식 (4) 및 식 (5)를 통하여 계산한다.

$$P_{pu} = \gamma_P(0.8f_{pu})A_{ps} \quad (4)$$

$$\phi P = \phi f_{ci}A \quad (5)$$

여기서,  $\gamma_P$ 는 하중 계수 1.2,  $0.8f_{pu}$ 는 최대 허용 긴장력,  $A_{ps}$ 는 긴장재의 단면적,  $\phi$ 는 강도 저감 계수 0.85,  $f_{ci}$ 는 프리스트레스 힘을 가하였을 때의 콘크리트 강도,  $A$ 는 정착판의 면적이다.

### 2.2 도로교 설계 기준에 따른 정착 구역 설계

도로교설계기준에서는 KDS 구조설계기준에서 제시하고 있는 파열력 산정식에서 긴장재의 각도를 고려하여 식 (6) 및 식 (7)과 같이 파열력을 산정하고 있다.

$$F_{bst} = 0.25P(1 - \frac{a}{h}) + 0.5P \sin\alpha \quad (6)$$

$$d_{bst} = 0.5(h - 2e) + 5e \sin\alpha \quad (7)$$

여기서,  $\alpha$ 는 긴장재와 부재 축이 이루는 각도를 나타낸다. 도로교설계기준에서는 부재에 발생하는 지압력을 식 (8)과 같이 콘크리트의 허용 지압력  $\phi P$ 가 계수 긴장력  $P_{pu}$  이상이 되도록 규정하고 있다.

$$\phi P = \phi f_b A_b' \quad (8)$$

콘크리트의 허용 지압력은 콘크리트의 허용 지압 강도를 바탕으로 산정되며, 이는 식 (9)와 식 (10) 중 작은 값을 사용한다.

$$f_b = 0.7f_{ci} \sqrt{\frac{A}{A_g}} \quad (9)$$

$$f_b = 2.25f_{ci} \quad (10)$$

인증 시험을 거치지 않은 정착 장치에 의해 발생하는 콘크리트의 지압 응력은 식 (11)의 값 이하로 설계하여야 한다고 제시하고 있다.

$$\text{긴장재 정착 직후} : 0.70f_{ci} \sqrt{\frac{A}{A_g}} - 0.2 \leq 1.10f_{ci} \quad (11)$$

여기서,  $f_b$ 는 콘크리트의 허용 지압 강도,  $\phi$ 는 강도 저감 계수로 정착 구역에서 보통 콘크리트의 경우 0.8을 사용한다.  $A$ 는 콘크리트 정착부의 하중 분산 면적,  $A_g$ 는 지압판의 전체 면적,  $A'_b$ 는 지압판에서 개구부 면적을 제외한 유효 지압 면적,  $f_{ci}$ 는 부재에 프리스트레스를 도입하였을 때의 콘크리트 강도이다.

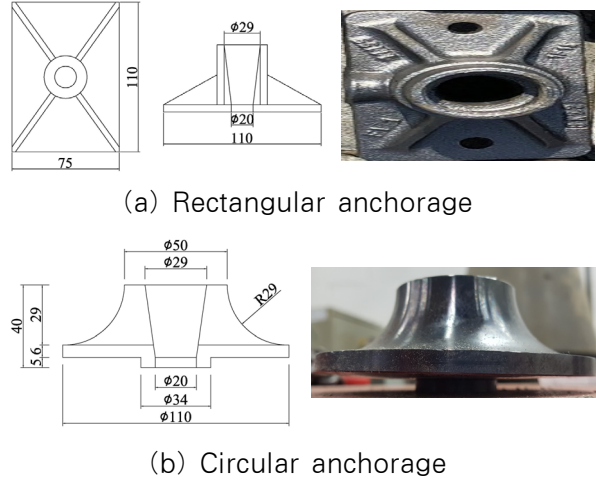
식 (10)에서 지압 응력의 최대값은 프리스트레스를 도입하였을 때 콘크리트 압축 강도( $f_{ci}$ )의 2.25배로 제한하고 있으므로 이를 식 (9)에 적용할 경우 콘크리트 정착부의 하중 분산 면적은 정착판 전체 면적의 10.33배에 해당한다고 볼 수 있다. 또한 인증 시험을 거치지 않은 정착구에 대해서 하중 분산 면적은 지압판 전체 면적의 2.67배를 초과할 수 없다.

### 3. 2400MPa 강연선의 적용성 검토

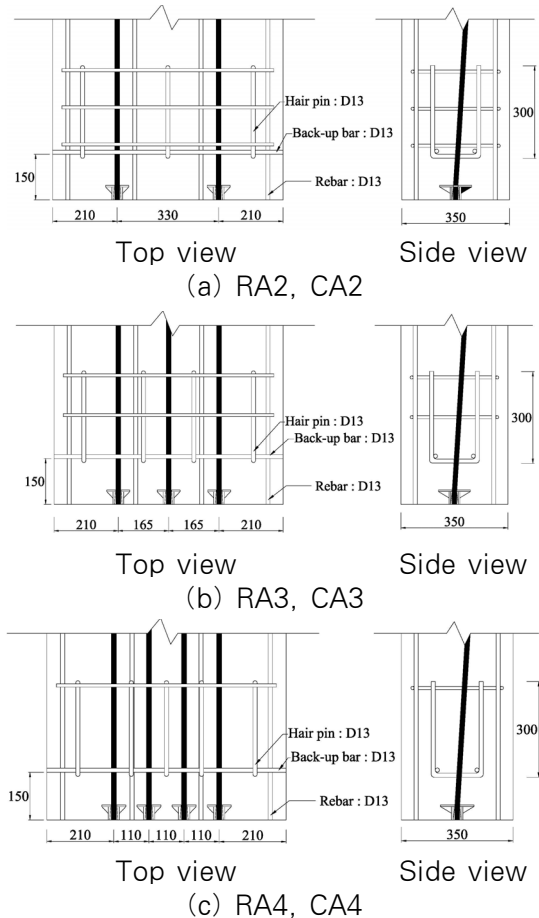
#### 3.1 실험 개요

KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준은 강연선의 인장 강도에 따른 구분 없이 정착 구역 설계를 제시하고 있다. 또한 파열력 간이 계산법에서는 정착구의 형상을 고려하지 않으며, 부재에 배치되는 긴장재 개수의 영향은 프리스트레스력의 총합으로만 고려하고 있다. 본 연구에서는 KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준에서 제시하고 있는 정착 구역 설계에 대하여 고강도 강연선의 적용 가능성을 확인하고자 2400MPa 단일 강연선이 적용된 포스트텐션 콘크리트 보 시험체 6개의 성능 시험을 수행하였다. 이때 정착구의 형상과 긴장재 배치 개수

에 따른 정착 구역 응력 변화를 파악하고자 사각 정착구 및 원형 정착구가 설치된 시험체를 각각 3개씩 제작하였으며 시험체에 배치된 긴장재는 2개, 3개, 4개로 변화시켰다. 정착구 상세는 <Fig. 2>에 나타내었다.



<Fig. 2> Anchorage type (mm)



<Fig. 3> Details of specimens (mm)

시험체 크기는 폭 750mm, 높이 350mm, 길이 4,000mm로 모두 동일하며 정착 구역 보강 철근은 KDS 구조설계기준에서 제시하고 있는 설계 기준에 따라 <Fig. 3>과 같이 배치하였다. KDS 구조설계기준에서는 정착 장치 개수에 따라 헤어핀 철근 및 페쇄스터립을 부재 단부의 수직 방향으로 n+1개 배치하도록 규정하고 있다. 긴장재의 인장 강도, 정착구의 형상, 긴장재 개수의 영향만을 평가하기 위하여 KDS 구조설계기준에서 제시하는 최소 부착 철근만 배치하였다. <Table 1>에 시험체의 변수를 정리하였다.

<Table 1> Variables of test specimens

Specimen	Anchorage type	Size (mm)	EA
RA2	Rectangular	(B×H×L) 750×350×4,000	2
RA3			3
RA4			4
CA2			2
CA3	Circular		3
CA4			4

시험체는 설계 압축 강도가 35MPa인 콘크리트를 사용하여 제작되었으며, 강연선 긴장 시 콘크리트의 압축 강도는 32MPa로 확인되었다. 보에 배치된 부착 철근은 지름이 13mm, 인장 강도가 400MPa인 이형 철근을 사용하였다. 시험에 사용된 긴장재는 KS D 7002 규격의 SWPC-7-D-L로 인장 강도가 2,400MPa, 단면적이 138.7mm<sup>2</sup>인 7연선이며, 정착구의 항복 강도는 490MPa이다. 재료의 물성치는 <Table 2>에 나타내었다.

<Table 2> Material properties

	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	
Concrete	32	35	
	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	
Rebar	400	200	
Anchorage	490	200	
	$f_{pu}$ (MPa)	$f_{py}$ (MPa)	$A_{ps}$ (mm <sup>2</sup> )
Strand (SWPC-7-D-L)	2,400	2,040	138.7

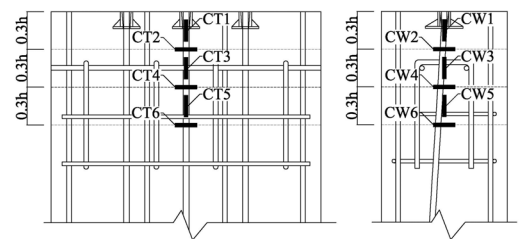
where,  $f_{ci}$  is compressive strength of concrete at jacking,  $f_{pu}$  is tensile strength of strand,  $f_{py}$  is yield strength of strand,  $A_{ps}$  is cross area of strand.

### 3.2 실험 방법

KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준은 포스트텐션 콘크리트 부재에서 강연선을 긴장재 인장 강도의 0.8배 또는 항복 강도의 0.94배 중 작은 값 이하로 긴장하여야 한다고 규정하고 있다. 본 연구에서는 <Fig. 4>와 같이 긴장재 항복 강도의 94%에 해당하는 266kN으로 긴장하였으며, 변형률 게이지를 <Fig. 5>와 같이 부착하여 긴장력 도입과 동시에 시험체에 발생하는 파열력과 지압력에 따른 변형률을 측정하였다. 파열력 측정을 위한 변형률 게이지는 시험체의 수평 방향으로 0.3h, 0.6h, 0.9h에 부착하였으며, 지압력은 시험체의 수직 방향으로 0.15h, 0.45h, 0.75h에 부착된 게이지를 통해 측정하였다. 여기서 h는 시험체의 높이를 나타낸다. 긴장 순서는 <Fig. 5>을 기준으로 좌측 강연선부터 긴장하였다.



<Fig. 4> Jacking to specimen



(a) Top view (b) Side view

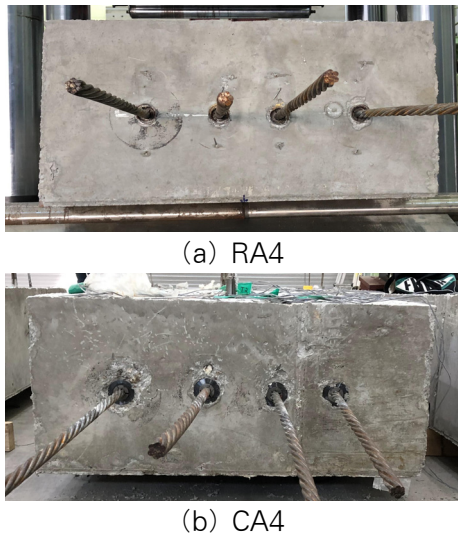
<Fig. 5> Location of strain gauge

## 4. 실험 결과

### 4.1 파괴 및 균열 양상

모든 시험체는 <Fig. 6>과 같이 강연선의 긴장에 따른 정착 구역의 파열력과 지압력에 의한 파괴 및 균열이 발생하지 않았으며, 긴장력으로 인한 썩기 및 정착구의 파괴도 발생하지 않았다. 이는 KDS 구조설계기준에서

제시하고 있는 단일 강연선의 정착 구역 설계에 따른 철근 배근 및 정착 장치의 배치가 정착 구역 내 콘크리트의 강성 및 내력을 증가시킨 것으로 판단된다.



〈Fig. 6〉 Test result of RA4, CA4

### 4.2 파열 응력 분석

실험에서 긴장력에 의해 측정된 변형률과 콘크리트의 탄성 계수를 이용하여 산정한 거리에 따른 파열 응력을 〈Table 3〉에 정리하였다. KDS 구조설계기준 및 도로교 설계기준으로 산정된 최대 파열력에 He & Liu(2011)<sup>6)</sup>가 제안한 식 (12)를 적용하여 설계 기준에 따른 최대 파열 응력을 산정하고 〈Fig. 7〉과 같이 실험으로부터 얻은 파열 응력과 비교하였다.

$$\sigma_{bst, max} = \frac{1 - a/h}{2} \frac{P}{bh} \quad (12)$$

여기서,  $\sigma_{bst, max}$ 는 최대 파열 응력,  $b$ 는 부재 단면의 폭을 나타낸다.

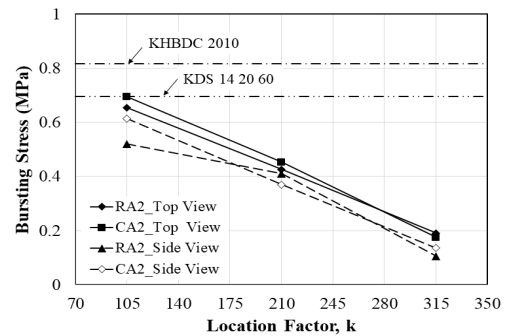
모든 시험체는 단부로부터 0.3h 떨어진 지점인 105mm에서 최대 파열 응력이 측정되었다. 각 시험체에서 발생한 최대 파열 응력은 RA2, CA2 시험체가 0.66MPa, 0.7MPa, RA3, CA3 시험체가 1.04MPa, 1.08MPa, RA4, CA4 시험체가 1.66MPa, 1.72MPa이었다.

최대 파열 응력은 정착구의 개수가 증가함에 따라 약 1.56배씩 증가하였으며, 시험체 단부에서 0.3h씩 멀어짐에 따라 약 0.65배씩 감소하였다. 또한 원형 정착구와

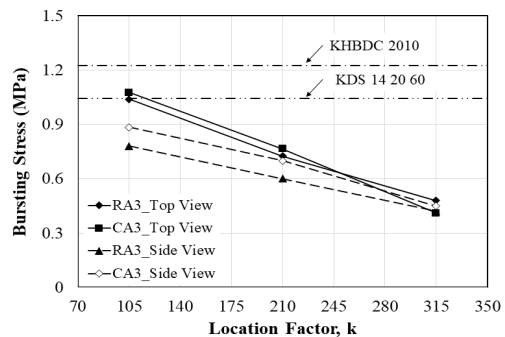
사각 정착구의 최대 파열 응력은 긴장재 개수와 무관하게 약 5% 차이를 보여 정착구 형상에 따른 최대 파열 응력의 차이는 미미한 것으로 판단된다.

〈Table 3〉 Bursting stress by distance (MPa)

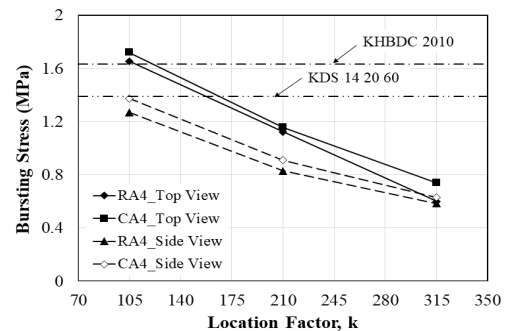
	Top View (mm)			Side View (mm)		
	105	210	315	105	210	315
RA2	0.66	0.43	0.19	0.52	0.41	0.11
CA2	0.7	0.45	0.18	0.62	0.37	0.14
RA3	1.04	0.73	0.48	0.78	0.61	0.42
CA3	1.08	0.77	0.41	0.89	0.69	0.45
RA4	1.66	1.12	0.6	1.27	0.83	0.59
CA4	1.72	1.16	0.74	1.38	0.91	0.63



(a) RA2, CA2



(b) RA3, CA3



(c) RA4, CA4

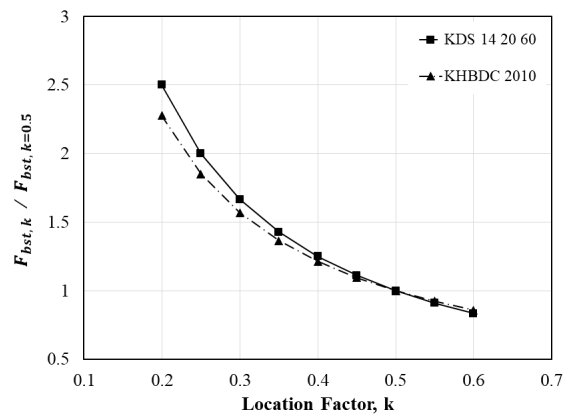
〈Fig. 7〉 Bursting stress in test

고강도 강연선이 2개 및 3개 배치된 시험체의 최대 파열 응력과 KDS 구조설계기준의 최대 파열 응력을 비교한 결과, 사각 정착구와 원형 정착구에서 각각 약 0.97배 및 1.02배로 산정되었다. 도로교설계기준에서는 약 0.83배 및 0.87배로 낮게 산정되어 도로교설계기준이 KDS 구조설계기준보다 최대 파열 응력을 보수적으로 산정하는 것으로 나타났다. 그러나 고강도 강연선이 4개 배치된 시험체의 경우 도로교설계기준에서는 사각 정착구와 원형 정착구에서 각각 1.02배 및 1.06배, KDS 구조설계기준에서 각각 1.19배 및 1.24배로 설계 기준보다 높은 파열력이 측정되었다. 이는 2,400MPa 강연선을 적용한 부재의 경우 0.3h 지점에서 최대 파열력이 발생하였으나 KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준에서는 0.5h로 가정하고 있어 최대 파열력을 과소평가하는 것으로 판단된다.

KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준은 최대 파열력의 위치를 0.5h로 제안하고 있으나 스트럿-타이 모델을 기반으로 최대 파열력을 산정할 경우 최대 파열력의 발생 위치에 따라 크기가 달라진다. 파열력 산정식에서 부재 단부부터 최대 파열력이 발생하는 위치까지의 거리를 부재 단면의 높이로 나눈 값을 위치 계수  $k$ 로 치환하면 KDS 구조설계기준의 파열력 산정식은 식 (13)과 같다. 도로교설계기준은 식 (13)에서 긴장재와 부재축이 이루는 각도의 영향을 고려하였다.

$$F_{bst} = \frac{P}{2} \frac{1}{kh} \left( \frac{h}{4} - \frac{a}{4} \right) = 0.125 \frac{P}{k} \left( 1 - \frac{a}{h} \right) \quad (13)$$

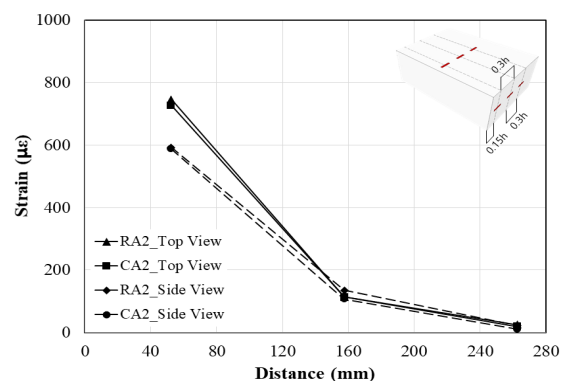
〈Fig. 8〉은 위치 계수  $k$ 에 따라 산정한 최대 파열력과 KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준으로 산정한 최대 파열력을 비교한 값이다. 이를 통해 최대 파열력의 발생 위치가 부재 단부와 가까워질수록 최대 파열력이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 2,400MPa 강연선을 적용할 경우 설계 기준에서 제시하고 있는 단부부터 최대 파열력 발생 위치까지의 거리 0.5h보다 가까운 위치에서 발생하기 때문에 정확한 정착 구역 설계를 위하여 국내 설계 기준에 따른 파열력 산정 시 이를 고려하여 최대 파열력 발생 위치가 결정되어야 한다고 판단된다.



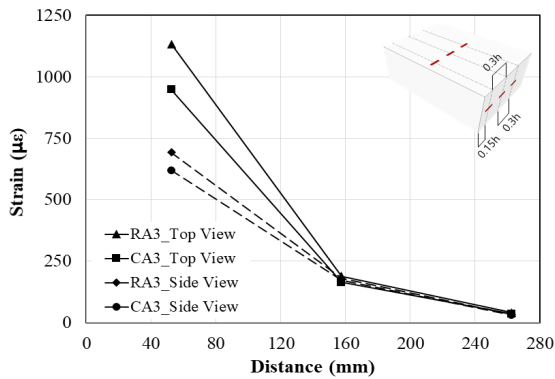
〈Fig. 8〉 Bursting stress in different location factor  $k$

### 4.3 지압력에 의한 변형률 분석

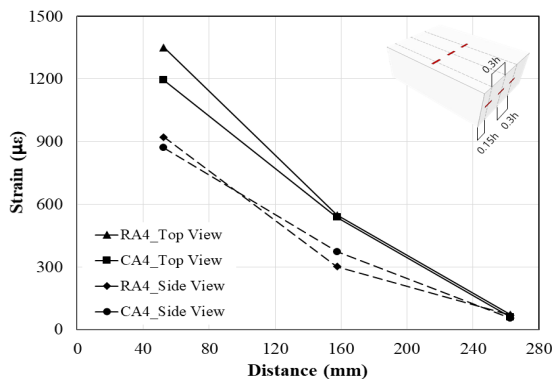
지압력에 의한 변형률을 〈Fig. 9〉에 나타내었다. 모든 시험체는 0.15h인 52.5mm 지점에서 최대 변형률이 발생하였으며, 시험체 단부로부터 거리가 멀어짐에 따라 변형률이 급격히 감소하였다. 긴장재가 2개 배치된 RA2, CA2의 변형률 차이는 3%였으며 긴장재가 3개 및 4개 배치된 RA3, CA3 및 RA4, CA4의 변형률은 각각 19%, 13%의 차이를 보여 사각 정착구를 적용한 부재의 지압력이 원형 정착구를 적용한 경우에 비해 더 크게 발생하는 것을 확인하였다. 긴장재 개수가 증가함에 따라 변형률도 비례적으로 증가하였으며, RA4, CA4 시험체에서 발생한 최대 변형률은 각각 0.00135, 0.0012로 콘 크리트 최대 압축 변형률인 0.003에 미치지 않았다.



(a) RA2, CA2



(b) RA3, CA3



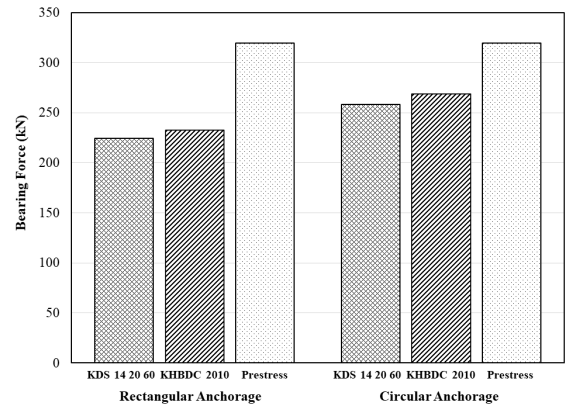
(c) RA4, CA4

〈Fig. 9〉 Bearing strain in test

KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준에서 규정하고 있는 허용 지압력과 하중 계수를 곱한 긴장력을 정착구 형상에 따라 비교하여 〈Fig. 10〉에 나타내었다. 도로교설계기준을 통한 허용 지압력 산정 시 하중 분산 면적과 지압판 면적의 비인  $A/A_g$ 는 보수적인 설계를 위하여 2.67로 가정하였다.

KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준은 사각 정착구의 허용 지압력을 각각 224.4kN, 232.4kN으로 산정하였으며, 이는 프리스트레스트력 대비 약 70%에 해당하는 수치이다. 원형 정착구의 경우 프리스트레스트력의 약 82%에 해당하는 258.5kN, 269.1kN으로 2,400MPa 강연선을 적용할 경우 정착구 형상과 무관하게 설계 기준을 만족하지 못하였다. 그러나 본 연구의 실험 결과, 지압력에 의한 콘크리트의 균열 및 파괴는 발생하지 않았으며, 콘크리트의 최대 압축 변형률을 초과하지 않았음을 확인하였다. 이는 정착 구역에 보강된 철근의 영향으로 정착부의 강도가 증진된 것으로 판단된다. KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준은 보수적인 설계를 위하여

정착 구역 보강 철근을 정착 구역의 파괴를 방지하는 목적으로만 설계한다. 그러나 정착 구역 보강 철근이 정착부의 강도를 증진시킨다는 다수의 선행 연구<sup>(7,8)</sup>와 본 연구의 실험 결과에 따라 KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준의 지압력 산정식에서 보강 철근으로 인한 정착부 강도 증진 효과를 고려하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.



〈Fig. 10〉 Comparison of bearing force to current design standards

## 5. 결론

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 구조설계기준(KDS 14 20 60) 및 도로교설계기준(2010)에서 제시하는 정착 구역 설계에 대해 2,400MPa 강연선의 적용 가능성을 평가하였다. 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

1) KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준은 최대 과열력의 위치를 0.5h로 제시하고 있으나 2,400MPa 강연선을 적용한 부재의 최대 과열력은 0.3h 지점에서 발생하였다. 국내 설계 기준에 따라 고강도 강연선을 구조물에 적용할 경우 최대 과열력이 낮게 산정된다. 이러한 특성에 따라 최대 과열력의 발생 위치를 결정하여 최대 과열력을 산정하고 철근을 보강한다면 2,400MPa 강연선을 국내 설계 기준에 따라 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

2) KDS 구조설계기준 및 도로교설계기준에 따른 사각 정착구 및 원형 정착구의 콘크리트 허용 지압력은 프리스트레스트력 대비 각각 약 70%, 82%로 설계 기준을 만족하지 못하였다. 그러나 실험 결과, 시험체의 파괴 및

균열이 발생하지 않았고, 지압력에 따른 최대 변형률이 콘크리트의 최대 압축 변형률 대비 약 45%로 측정되었다. 이는 정착 구역 내 보강 철근의 영향으로 콘크리트의 강성 및 내력이 증진된 것으로 판단되며, 국내 설계 기준에서 콘크리트 구속 효과를 고려한다면 2,400MPa 강연선을 설계 기준에 따라 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2017R1A2B2005581).

### References

1. KDS 14 20 60, Korean Design Standard, Korea Construction Standard Center, 2016.
2. KHBDC Code, Korean Highway Bridge Design Code, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010.
3. Park, H., Cho, J. Y., & Kim, J. S., "Investigation on Applicability of 2400 MPa Strand for Posttensioned Prestressed Concrete Girders", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.24, No.6, pp.727~735, 2012
4. Kim, S. W., Lho, B. C., & Lim, J. H., "The Load Transfer Performance of Post-tension Anchorage with 2,400 MPa Strands", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.22, No.6, pp.63~71, 2018
5. Lee, Y. H., Cho, Y. W., & Kim, M. S., "Development and Analysis of Unbonded Post-tensioned Anchorage for Single Tendon", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.31, No.1, pp.39~46, 2018
6. He, Z. Q., & Liu, Z., "Investigation of Bursting Forces in Anchorage Zones: Compression-Dispersion Models and Unified Design Equation", Journal of Bridge Engineering, Vol.16, No.6, pp.820~827, 2011
7. Kwon, Y. S., Yang, J. M., & Kim, J. K., "Experimental Study on the Ultimate Bearing Strength of Post-Tensioning Anchorage Zone", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.16, No.4, pp.175~183, 2016
8. Breen, J. E., Burdet, O., Roberts, C., Sanders, D., & Wollmann, G. (1994). Anchorage Zone Reinforcement for Post-tensioned Concrete Girder (NCHRP Report 356). USA: Transportation Research Board.

- Received : November 22, 2019
- Revised : December 13, 2019
- Accepted : December 14, 2019