



## 고강도 전단보강철근을 사용한 포스트텐션 프리스트레스트 콘크리트 보의 전단거동 평가

전병구<sup>1)</sup> · 이재만<sup>2)</sup> · 임혜선<sup>3)</sup> · 이정윤<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 <sup>2)</sup>롯데건설 기술연구원 <sup>3)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과

### Shear Behavior of Post-tensioning PSC Beams with High Strength Shear Reinforcement

Byung-Koo Jun,<sup>1)</sup> Jea-Man Lee,<sup>2)</sup> Hye-Sun Lim,<sup>3)</sup> and Jung-Yoon Lee<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Lotte Engineering & Construction, Seoul 06527, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil, Architectural, and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The KCI-12 and ACI 318-14 design codes limit the maximum yield strength of shear reinforcement to prevent concrete compressive crushing before the yielding of shear reinforcement. The maximum yield strength of shear reinforcement is limited to 420 MPa in the ACI 318-14 design code, while limited to 500 MPa in the KCI-12 design code. A total of eight post-tensioning prestressed concrete beams with high strength shear reinforcement were tested to observe the shear behavior of PSC beams and the applicability of the high strength reinforcement was thus assessed. In the all PSC beam specimens that used stirrups greater than maximum yield strength of shear reinforcement required by the ACI 318-14 design code, the shear reinforcement reached their yield strains. The observed shear strength of tested eight PSC beams was greater than the calculated ones by the KCI-12 design codes. In addition, the diagonal crack width of all specimens at the service load was smaller than the crack width required by the ACI 224 committee. The experimental and analytical results indicate that the limitation on the yield strength of shear reinforcement in the ACI 318-14 design code is somewhat under-estimated and needs to be increased for high strength concrete. Also the application of high strength materials to PSC is available with respect to strength and serviceability.

**Keywords** : shear reinforcement, high strength, prestressed concrete beams, diagonal crack width, shear design

### 1. 서 론

최근 초고층 건물 및 장대교량, 원자력 구조물 등과 같은 대형 구조물 건설이 증가함에 따라 구조재료의 고강도화에 대한 관심이 늘고 있다. 특히, 세계적으로 원자재가 부족하고 이로 인하여 철근의 가격이 상승하여 고강도 철근의 적용에 대한 필요성이 증가하고 있다. 고강도 철근을 사용할 경우에 철근의 물량이 감소하고, 철근의 배근 간격을 넓힐 수 있어 시공성 향상에도 기여할 수 있다.

그러나 고강도 철근을 적용할 경우, 철근 콘크리트 구조물(이하 RC)에 과도한 균열이나 처짐이 발생할 수 있기 때문에 고강도 철근의 적용을 위해서는 재료 성질, 구

조성능 및 사용성 측면에서의 검토가 필요하다. 현재 국내외 설계 기준에서는 전단보강철근의 최대 항복강도를 제한하고 있으며 이는 전단보강철근의 항복을 유도하고 사인장균열의 폭을 제어하기 위함이다. 전단보강철근의 항복강도 관점에서 살펴보면 국내 콘크리트구조기준(2012)<sup>1)</sup>(이하 KCI-12)에서는 전단보강철근의 최대 항복강도를 500 MPa로 제한하고 있다. 이와 유사하게 ACI 318-14<sup>2)</sup>에서는 전단보강철근의 최대 항복강도를 420 MPa로 제한하고 있다. EC2-02<sup>3)</sup>에서는 전단보강철근의 항복강도를 600 MPa까지 허용하고 있으며 CSA-04<sup>4)</sup>에서는 500 MPa까지 허용하고 있다. 이처럼 현행 설계기준에서는 프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC) 구조의 전단거동평가에 있어서 스티럽의 항복강도를 RC 전단내력 평가와 동일하게 500 MPa로 제한하고 있어 고강도 철근을 사용할 경우, 규정된 상한값을 초과하는 강도의 상승분을 내력에 포함시킬 수 없고 이는 고강도 재료의 적용을 저해시키는 요인으로 작용한다.

Bazant et al.<sup>5)</sup> 및 Wolf et al.<sup>6)</sup> 등의 연구를 통해 보통강

\*Corresponding author E-mail : jungyoon@skku.edu  
 Received May 12, 2015, Revised September 1, 2015,  
 Accepted September 21, 2015  
 ©2016 by Korea Concrete Institute

도 재료를 사용한 RC 및 PSC의 전단거동에 대한 여러 연구가 이루어져 왔지만 고강도 재료를 사용한 PSC 부재의 실험 및 연구는 상대적으로 부족한 상황이다. 특히, PSC 구조의 경우에는 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 전단 거동에 대해서는 일부 보고되고 있지만 고강도 철근의 적용성에 관한 연구는 부족하다.<sup>7,8)</sup> KCI-12 기준의 경우 전단보강철근의 항복강도를 기존의 400 MPa에서 500 MPa로 상향시켰으며 이 연구에서도 항복강도가 500 MPa 이상이 되는 스티럽을 고강도철근으로 간주하였다. 이는 고강도 전단보강철근을 사용한 RC 보의 전단강도, 전단파괴모드, 사인장균열의 폭에 대한 선행 연구들에 근거한 것이다.<sup>9,10)</sup> 이에 비해 고강도 전단보강철근을 사용한 PSC 부재의 전단거동평가에 대한 연구는 미흡하며, PSC 부재는 긴장력에 의한 축압축력이 작용하여 RC와는 다른 전단거동을 나타내므로 국내 기준에 대한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 총 8개의 고강도 재료를 사용한 포스트텐션 PSC 보 전단실험을 실시하여 PSC 보의 전단거동을 평가하였다. 또한 전단 파괴모드, 전단보강철근의 항복유무, 전단 내력 그리고 사인장균열의 폭 및 수 등의 분석을 통해 PSC 부재에 고강도 전단보강철근의 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 설계

PSC 보의 전단보강철근 항복강도에 따른 전단거동을 평가하기 위해 총 8개의 PSC 보 실험체를 제작하였다. 시험체는 단면 형상에 따라 사각형 단면, I형 단면을 갖는 실험체 그룹으로 구분하였다. 각 그룹은 4개의 보 실험체로 구성되어 있으며, 전단보강철근을 배근하지 않은 기본 실험체와 전단보강철근을 배근한 실험체로 계획하였다. 또한 모든 실험체가 휨 파괴 이전에 전단파괴하여 전단거동을 파악할 수 있도록 실험체의 전단 여유도(공칭 전단강도/공칭 휨강도)를 0.7 이하로 하였다.

사각형 단면 그룹의 PSC 보 실험체 단면은 370×500 mm, I형 단면 그룹의 실험체 단면은 250×130×340×450 mm이며, 전단경간비(a/d)는 모두 2.3 이 되도록 계획하였다. 주철근은 항복강도 501.9 MPa인 D29 철근을 인장측에 5대, 압축측에 5대 배근하였으며 전단보강철근은 D10 철근을 부재측에 직각이 되도록 배근하였다. 전단철근의 유무 및 항복강도에 따라 사각형 단면 RB-0, RB-280, RB-450, RB-500 실험체와 I형 단면 IB-0, IB-280, IB-450, IB-500 실험체로 구분하였다. 각 그룹의 실험체는 동일한 형상을 갖도록 제작하였으며, 전단보강철근의 항복강도는 Table 1에 표시한 것과 같이 281.8, 448.8, 499.5 MPa의 3종류이다. 실험체의 상세 계획은 Fig. 1과 같다. 전단파괴의 여부 및 전단위험단면의 변형률을 알아보기 위하여 주인장 및 압축 철근과 전단보강철근에 각 5개씩 변형률 게이지를 부

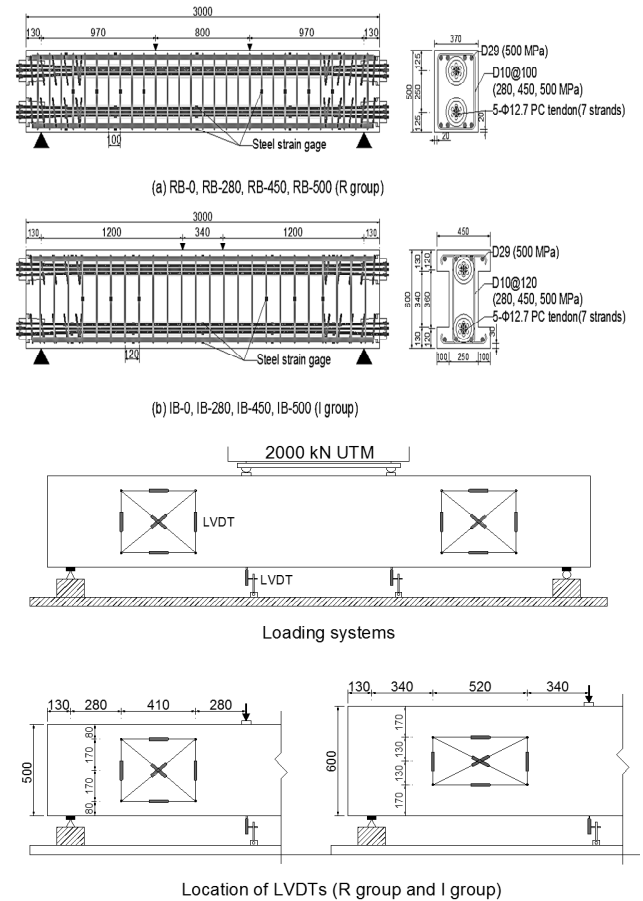


Fig. 1 Overall dimension of specimens and test instrumentations

착하였으며 긴장재에도 5개의 변형률 게이지를 부착하여 긴장도입시 긴장력을 확인하였다.

모든 실험체에는 직경 12.7 mm ( $A_p=98.71 \text{ mm}^2$ ) 7연선 긴장재를 인장측과 압축측에 각각 5대를 배근하여 포스트텐션 방식으로 긴장력을 가하였다. 강연선의 인장강도와 항복강도는 각각 1580.4, 1853.9 MPa이다. 사각형 단면 그룹과 I형 단면 그룹의 실험체에는 각 1014 kN (긴장률,  $f_{pi}/f_{py} : 0.65$ )과 780 kN (긴장률 : 0.5) 긴장력을 적용시키도록 설계하였다. 프리스트레스트 손실율은 KCI-12 기준을 따라 단기, 장기적인 요인들을 고려하여 반영하였다. 실험체의 초기 및 유효 긴장력 등은 Table 2에 표시한 것과 같다.

### 2.2 하중가력 및 측정장비 계획

PSC 보 실험체에 Fig. 1과 같이 전단균열이 발생할 것으로 예측되는 좌측과 우측 전단영역에 각각 수평방향, 수직방향 2개, 대각방향 2개씩 LVDT (선형변위측정기)를 설치하여 웨브의 변위를 측정하였으며, 2점 가력점 연직 아래에 2개의 LVDT를 설치하여 실험체의 처짐을 측정하였다. 또한 균열게이지 2개를 이용하여 전단 영역에서 발생하는 사인장균열폭을 측정하였으며, 추가적으로

**Table 1** Specification of PSC beam specimens

Beams	a/d	$f_{ck}$ (MPa)	Longitudinal tensile bars			Shear steel bars			
			No. rebar & diameter	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	diameter	s (mm)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_t$ (%)
RB-0	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.67	D10	/	/	/
RB-280	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.67	D10	100	281.8	0.39
RB-450	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.67	D10	100	448.8	0.39
RB-500	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.67	D10	100	499.5	0.39
IB-0	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.27	D10	/	/	/
IB-280	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.27	D10	120	281.8	0.48
IB-450	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.27	D10	120	448.8	0.48
IB-500	2.3	56.9	4-D29	501.9	1.27	D10	120	499.5	0.48

Where,  $f_{yt}$  : Yield strength of longitudinal bars,  $\rho_l$  : Longitudinal reinforcement ratio,  $f_{yt}$  : Yield strength of stirrups,  $\rho_t$  : Shear reinforcement ratio

**Table 2** Specification of prestressing tendons

Beams	Prestressing Tendons			$P_i$ (kN)	$P_e$ (kN)	$P_e/bDf_{ck}$
	No. strand & diameter	$f_{py}$ (MPa)	$\rho_{pt}$ (%)			
RB-0	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.32	828	745	0.073
RB-280	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.32	917	826	0.081
RB-450	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.32	857	771	0.076
RB-500	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.32	812	730	0.072
IB-0	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.24	866.7	780	0.095
IB-280	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.24	648.3	583	0.071
IB-450	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.24	738.9	665	0.081
IB-500	5- $\Phi$ 12.7	1580.4	0.24	868	781	0.095

Where,  $f_{py}$  : Yield strength of tendons,  $\rho_{pt}$  : Prestressing tendon ratio,  $P_i$  : Initial prestressing force,  $P_e$  : Effective prestressing force,  $P_e/bDf_{ck}$  : Prestressing force ratio

발생하는 균열폭에 대해서는 균열확대경을 통해 하중 단계별로 지속적으로 측정하였다.

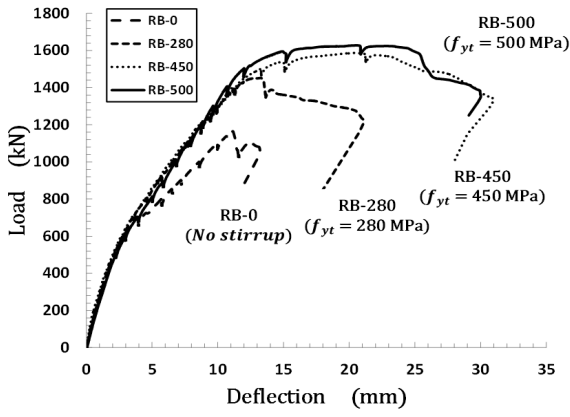
실험체 가력은 만능시험기를 사용하여 상부에서 2점 가력 하였으며, 가력속도는 1초당 0.02 mm로 변위제어 하였다. 가력시 100 kN 마다 균열확대경으로 실험체의 균열 상태를 점검 하였으며, 사인장균열이 발생한 이후에 균열개지를 부착하여 균열의 폭을 측정하였다. 하중은 실험체가 최대강도에 도달한 후 최대강도의 90% 이하로 감소할 때까지 가력 하였다.

### 3. 실험 결과

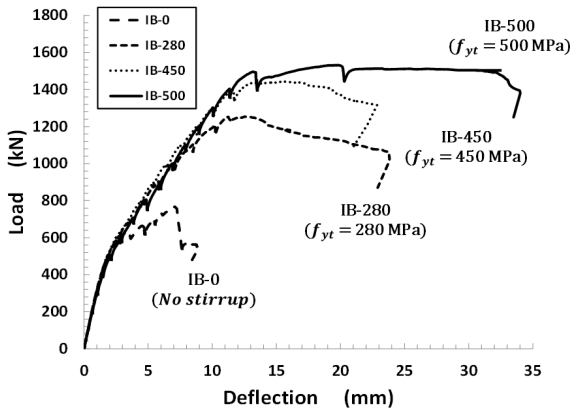
모든 실험체는 전단보강철근의 항복후에 파괴되었으며 실험체 RB-450, RB-500, IB-500을 제외한 5개의 PSC 보 실험체는 주인장철근이 항복하기 이전에 전단파괴 하였다. IB-500 실험체는 최대하중에 도달하기 이전에 주인장철근이 항복하여 전단파괴 하였으므로 본 연구의 비교 분석에서 제외하였다. RB-450, RB-500 실험체는 주인장철근의 휨항복에 도달하기 직전에 최대하중에 도달하여

전단보강철근이 전단력에 유효하게 저항하였기 때문에 본 연구의 비교분석에 포함하였다. 파괴모드의 판정은 주철근 및 전단보강철근에 부착한 변형률 게이지 측정값에 근거하였으며 IB-500, RB-450, RB-500 실험체가 최대하중에 도달하는 시점에서 주인장철근의 변형률은 각각  $1.14\epsilon_{yt}$ ,  $0.98\epsilon_{yt}$ ,  $0.97\epsilon_{yt}$ 이다(여기서  $\epsilon_{yt}$ 는 주철근의 항복변형률이다). 모든 실험체는 최대 모멘트가 발생하는 보 중앙부에서 휨균열이 먼저 발생한 이후에 하중의 단계가 증가함에 따라 휨전단균열, 복부 전단균열이 차례로 발생하였다. 사인장균열의 수는 하중이 증가함에 따라 증가하였다.

Fig. 2는 실험체의 하중과 처짐 곡선을 나타낸다. 전단보강철근의 강도가 증가함에 따라 이에 상응하는 최대하중 및 처짐이 증가하였다. 전단 내력의 경우, 전단보강철근이 없는 RB-0, IB-0 실험체와 전단보강철근의 항복강도가 비교적 낮은 RB-280, IB-280 실험체는 최대 하중에 도달한 이후에 급격하게 강도가 떨어지는 양상을 보였지만 고강도 전단보강철근이 사용된 실험체에서는 최대하중에 도달한 이후 강도의 감소폭이 비교적 완만한 양상을 보였다. 이는 고강도 전단보강철근을 사용한 실험체



(a) Group-RB



(b) Group-IB

Fig. 2 Load versus deflection curves

의 경우 최대하중에 도달하는 시점에서 주인장철근이 휨항복 하였기 때문인 것으로 판단된다. 실험체의 최대전단내력, 최대처짐, 파괴모드 등의 실험결과를 Table 3과 같다.

Regan et al.<sup>11)</sup>의 연구결과에 따르면 전단균열의 수와 폭은 다양한 변수에 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 전단철근의 양( $\rho_v f_{yt}$ ), 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )에 따라 영향을 받는다. 이 실험의 결과에서도 전단철근이 없는 RB-0, IB-0 실험체와 전단철근의 양이 비교적 적은 RB-280, IB-280 실험체는 전단구간에서 사인장균열 발생 후 해당 균열에서 집중적인 파괴가 발생하였다. 그러나 전단철근의 양이 많은 고강도 전단보강철근 실험체 그룹에서는 비교적 많은 수의 사인장균열이 발생한 이후에 파괴되었다.

또한 Sozen et al.<sup>12)</sup>의 선행 실험연구 등에 따르면 PSC 보의 전단파괴는 휨-전단균열 파괴와 복부-전단균열 파괴로 구분이 되며 이는 국내외 PSC 전단 내력 설계기준에도 반영이 되어있다. 사각형 단면을 갖는 RB 그룹의 경우 파괴가 휨-전단균열 중립축까지 진전된 후, 해당균열에서 파괴가 지배적으로 일어난 반면 I형 단면을 갖는 IB 그룹의 PSC 보는 상대적으로 복부-전단 균열 부분에서 파괴가 지배적이었다. 이는 얇은 두께의 복부를 갖기 때문에 복부 콘크리트보다 상부 압축대가 상대적으로 강한 I형 단면의 형상에 영향을 받은 것으로 생각된다.

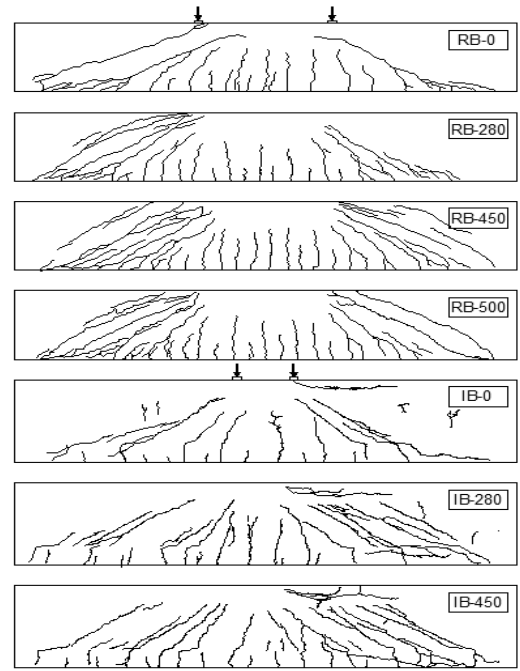


Fig. 3 Cracks after test

Table 3 Test results

Beams	Test results		$V_{cal}$ (kN)	$\frac{V_{max}}{V_{cal}}$	Failure modes
	$V_{max}$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)			
RB-0	582.5	11.15	385.8	1.51	SF
RB-280	726.5	13.29	552.3	1.32	SYCF
RB-450	793.5	20.58	653.4	1.21	SYCF
RB-500	813.6	20.67	683.2	1.19	SYCF
IB-0	383.7	7.09	325.6	1.18	SF
IB-280	627.0	12.58	470.4	1.33	SYCF
IB-450	722.0	15.62	595.5	1.21	SYCF
IB-500	765.8	19.78	635.0	1.20	SYCF&FF

Where, SF : Shear failure, SYCF : Shear failure after yielding of shear reinforcement, FF : Flexural failure

## 4. 실험 결과 분석

### 4.1 전단내력

Fig. 4는 전단보강철근의 양( $\rho_v f_{yt}$ )에 따른 각 실험체의 실험 결과에 의한 전단내력을 나타내며 기준선은 KCI-12 기준의 전단식(식 (7.3.8), (7.3.10), (7.4.3))을 통해 계산된 전단내력을 의미한다. 모든 PSC 실험체의 전단내력은 전단보강철근의 항복강도가 증가할수록 즉, 전단보강철근의 양이 많아짐에 따라 선형적으로 증가하였다. IB 그룹 실험체의 전단보강철근의 양이 RB 그룹의 전단보강철근 양보다 크더라도 전단내력이 작은 이유는 콘크리트에 의한 전단저항 기여분이 단면형상의 크기에 영향을 받았기 때

## 4.2 전단보강철근의 변형률 분포

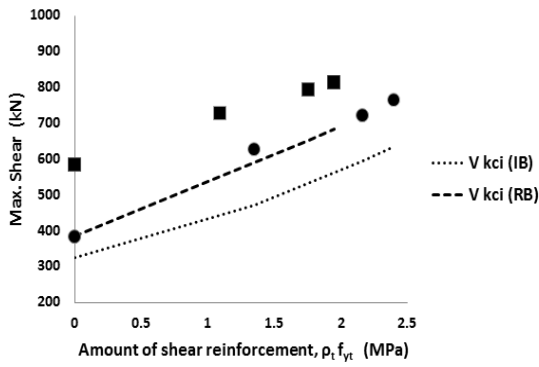


Fig. 4 Shear strength versus amount of shear reinforcement ( $\rho_t f_{yt}$ )

문이다.

Table 3을 보면 각 그룹 실험체의 전단내력 실험값과 KCI-12 기준식을 통해 계산한 PSC 전단내력을 비교하였다. 모든 실험체의 PSC 전단내력이 KCI-12 기준식의 전단내력보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 전단보강철근의 항복강도를 420 MPa로 제한하는 ACI 318-14 기준식의 경우에 제한값 이상의 고강도 전단보강철근을 PSC부재에 적용할 수 있음을 확인하였다. 그러나 실험값과 기준식 설계값의 비율인  $V_{max}/V_{cal}$ 의 경우, 전단보강철근의 항복강도가 높아짐에 따라 작아지는 경향을 나타냈다. 예를 들어 RB 그룹 실험체에서는 전단보강철근의 항복강도가 커짐에 따라  $V_{max}/V_{cal}$  값이 1.51, 1.32, 1.21, 1.19로 작아진다. 이를 통해 본 연구에서 사용한 전단보강철근의 항복강도(500 MPa) 이상의 전단보강철근이 사용되었을 때, 전단보강철근의 항복유무에 따라 전단여유치가 1보다 작아질 가능성이 있으며 이에 대한 추후의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

국내외 콘크리트구조기준의 전단설계에서 전단보강철근의 항복강도를 제한하는 이유는 고강도 철근 사용시 전단보강철근이 항복하기 이전에 콘크리트 복부가 선행 압축 파괴하는 것을 방지하기 위함이다. 고강도 철근의 경우 항복변형률이 일반강도 철근보다 크기 때문에 전단보강철근이 항복하기 이전에 복부 콘크리트가 압축 파괴할 가능성이 높다. 전단보강철근이 항복하지 않으면 현행 전단설계기준 내력 평가식에서 전단보강철근 전단기여분의 항복강도를 사용할 수 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 전단보강철근에 부착된 변형률 게이지 값을 이용하여 PSC부재에 적용된 고강도 전단보강철근의 항복 유무를 관찰하였다. Fig. 5는 하중 가력부터 최대하중인  $P_{max}$  시점까지 하중가력을 5단계로 구분한 후에 변화하는 전단보강철근의 변형률을 나타낸다. 그림에서 x 축은 실험체의 단부에서부터 변형률 게이지가 부착된 전단보강철근까지의 위치를 나타내며, y 축은 각 하중 단계별로 게이지를 통해 측정된 전단보강철근의 변형률을 나타낸다.

Fig. 5를 보면 RB 및 IB 그룹의 모든 실험체가 최대 하중에 도달하기 이전 또는 도달하는 시점에서 전단보강철근이 항복하였다. 전단보강철근의 변형률은 하중의 단계가 올라감에 따라 증가하였으며 특히, ACI 318-14 기준에서 제한하는 전단보강철근의 항복강도인 420 MPa 보다 높은 450, 500 MPa의 전단보강철근을 사용한 RB-450, 500 및 IB-450 실험체의 경우에도 전단보강철근이 모두 항복한 이후에 최대 내력에 도달함을 알 수 있다. 즉, PSC 보에 500 MPa의 고강도 철근을 전단보강철근으로 사용하여도 콘크리트 복부의 선행 압축 파괴 없이 항복하였다. 이

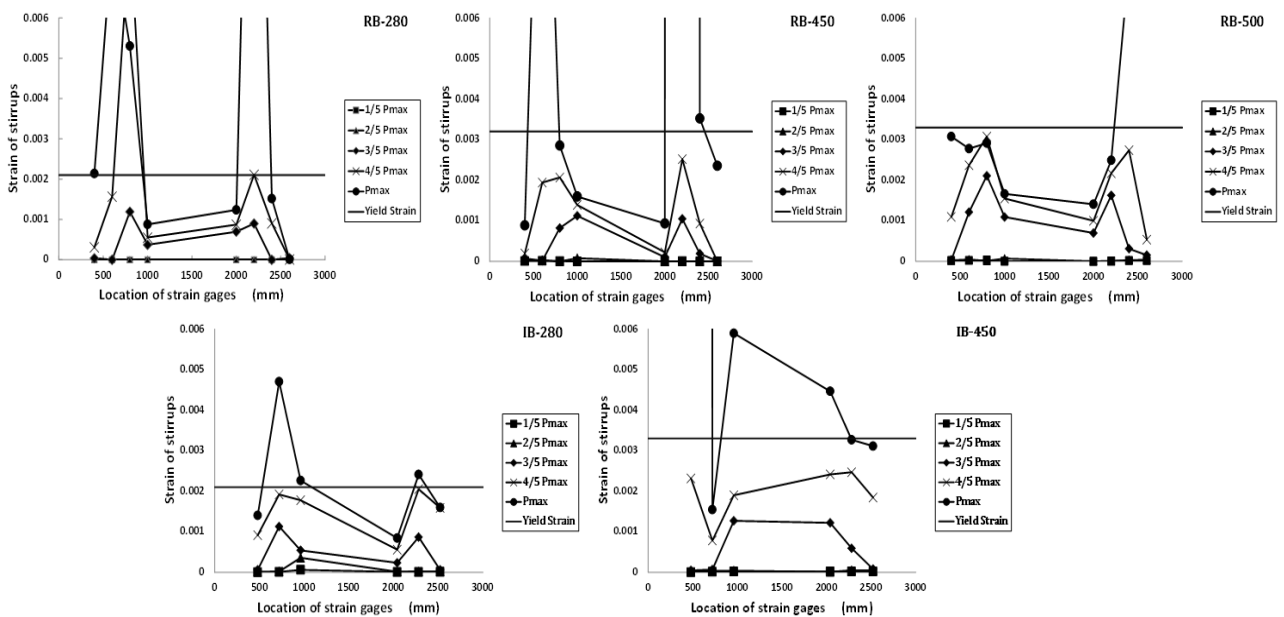


Fig. 5 Strain distribution of shear reinforcement

를 통해 전단보강철근의 항복 유무의 관점에서 ACI 318-14의 전단보강철근 제한 기준이 다소 안전측에 속하는 것으로 사료되며 KCI-12 기준의 전단보강철근 제한값은 PSC 부재에 대해서 적용 가능한 것으로 판단된다.

### 4.3 사인장균열의 폭 및 수

전단보강철근의 항복강도를 제한하는 또 다른 이유는 사용성과 관련이 있다. 전단보강철근의 항복강도가 증가할 경우 사인장균열의 폭 및 수가 증가할 우려가 있다. Fig. 6은 각 실험체에 설치했던 LVDT를 이용하여 콘크리트 복부의 변위를 사용하중 단계에서 발생한 사인장균열의 숫자로 나누어 계산한 균열폭의 결과이고 Fig. 7은 균열확대경을 이용하여 매 100 kN 마다 측정된 사인장균열의 폭을 나타낸다. LVDT 및 균열확대경을 이용한 측정 결과, 실험체의 전단보강철근의 항복강도가 커짐에 따라 대체로 균열폭이 감소하는 경향을 보였다.

ACI 224 보고서<sup>13)</sup>에서는 사용하중 단계를 설계강도를 사용하여 계산한  $P_{max}$ 의 60% 단계로 보고 있으며, 사용 목적에 손상을 주지 않도록 균열폭을 0.41 mm 이내로 제한하고 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 보면, 모든 실험체의 사인장균열폭이 사용하중 단계에서의 한계 균열폭인 0.41 mm 보다 작은 것으로 나타났다. 즉, RB-450, RB-500, IB-450

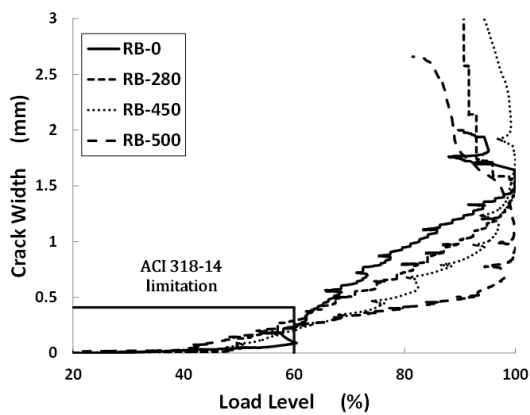
실험체의 사인장균열폭을 통해 PSC 부재에 ACI 318-14에서 제한하는 전단보강철근의 항복강도 이상을 사용하여도 균열폭의 사용성 기준을 만족함을 알 수 있다.

한편, Eurocode EC2에서는 균열폭의 산정식을 다음과 같이 제안하고 있다.

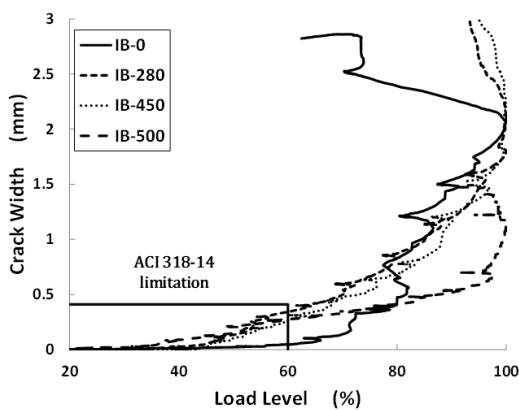
$$w_k = \beta S_{r,m} \epsilon_{s,m} \quad (1)$$

여기서  $w_k$  : 설계 균열폭,  $S_{r,m}$  : 평균 균열 간격,  $\epsilon_{s,m}$  : 균열면에서의 평균 전단철근 변형률,  $\beta$  : 설계 균열폭 계수 (하중에 의한 균열시 1.7)이다. 즉, RC 및 PSC 부재에서 발생하는 균열의 폭은 균열이 발생한 지점의 변형률과 생성된 균열의 간격과 밀접한 관련이 있다.

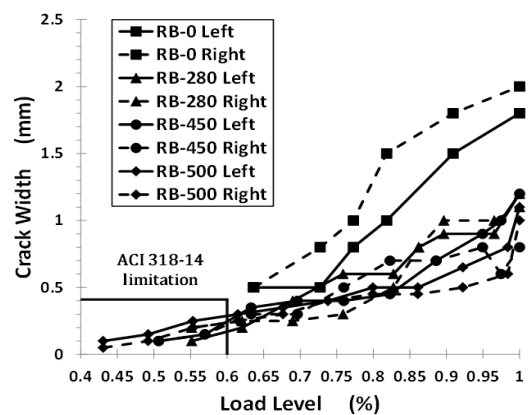
Fig. 8은 IB-500 실험체를 제외한 7개 실험체의 전단보강철근의 양( $\rho_{lf,gt}$ )에 따른 최대 강도 시점 단계에서의 사인장균열의 폭을 나타내고 있다. 실험체의 전단보강철근의 양이 커짐에 따라 사인장균열의 폭이 감소하는 경향을 보이며 이는 실험체의 지점과 가력점 사이의 웹에서 발생한 사인장균열의 수와 관련이 있는 것으로 판단된다. Fig. 9를 보면 전단보강철근의 양이 큰 실험체에서 사인장균열의 수가 더 많이 발생하는 경향을 가진다. 즉, 전단 균열 수의 증가는 균열의 간격이 감소하는 것을 의미하며 식 (1)의 관계와 같이 균열의 간격이 작아져 사인



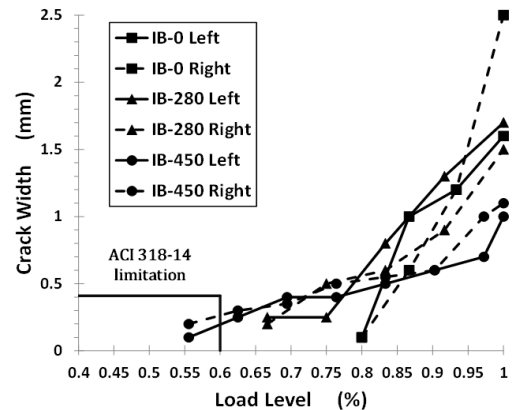
(a) Group-RB



(b) Group-IB



(a) Group-RB



(b) Group-IB

Fig. 6 Width of diagonal cracks by LVDT

Fig. 7 Width of diagonal cracks by magnifier

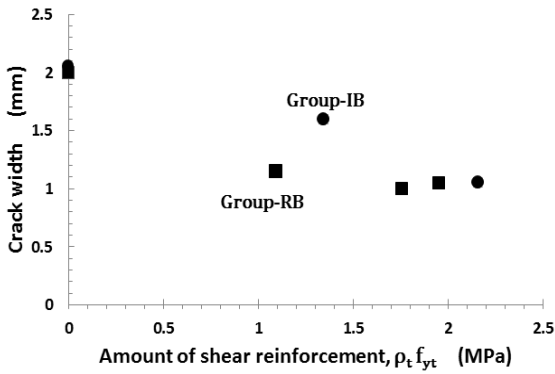


Fig. 8 Crack width versus amount of shear reinforcement ( $\rho_t f_{yt}$ )

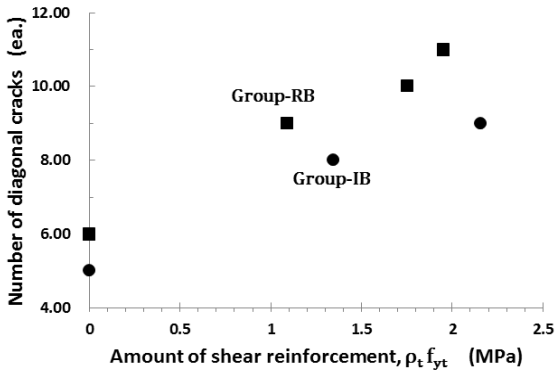


Fig. 9 Number of diagonal cracks versus amount of shear reinforcement ( $\rho_t f_{yt}$ )

장균열의 폭이 감소한 것으로 판단된다. 다만, 사인장균열의 폭과 수의 관계에 대해 본 연구에서 다른 영향요소 외에 전단보강철근의 간격 및 철근비, 부착력 등의 다양한 요인이 있을 수 있으므로 이에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 단면형상과 전단보강철근의 항복강도가 변수인 8개의 포스트텐션 PSC 보 전단 실험을 통하여 전단보강철근의 항복여부 및 사인장균열의 폭을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모든 PSC 실험체의 전단내력이 KCI-12 전단강도 평가 기준식에 의한 전단강도 이상으로 측정되었다. 전단내력은 전단보강철근의 양( $\rho_t f_{yt}$ )이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 전단보강철근의 항복강도가 커짐에 따라 전단여유치( $V_{max}/V_{cul}$ )가 감소하여 고강도 전단보강철근을 사용할 경우 기존 내력 평가식의 안전율에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 2) ACI 318-14에서 요구하는 항복강도 제한값(420 MPa) 이상의 고강도 전단보강철근을 사용한 모든 PSC

실험체가 전단보강철근이 항복한 이후에 최대 내력에 도달하였다. 이를 통해 ACI 318-14의 전단보강철근 제한 기준이 다소 안전측에 속하는 것으로 사료된다.

- 3) 500 MPa의 고강도 전단보강철근을 사용한 PSC 실험체의 사인장균열의 폭은 사용성 균열폭의 한계값인 0.41 mm를 초과하지 않았다. 이를 통해 PSC 부재에 고강도 전단보강철근을 사용해도 사용성에 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.
- 4) 실험체의 전단보강철근의 양( $\rho_t f_{yt}$ )이 커짐에 따라 사인장균열의 수가 증가하였고 균열의 폭은 감소하는 경향을 보였다. 이는 전단보강철근의 항복강도가 커짐에 따라 전단균열의 수가 증가하여 균열의 간격이 감소하였고 이로 인해 사인장균열의 폭이 감소한 것으로 판단된다.

본 연구의 실험결과에 근거하여 KCI-12 기준에서 제한하는 전단보강철근의 항복강도(500 Mpa)는 PSC 부재에 대해서 전단내력 및 균열의 사용성 측면을 모두 만족하는 것으로 판단되며 ACI 318-14의 전단보강철근 제한 기준은 다소 안전측에 속하는 것으로 사료된다. 다만, 본 연구에서는 전단보강철근의 항복강도를 주요 변수로 하여 PSC 부재의 전단거동에 대해 평가하였으나, 전단보강철근의 간격 및 철근비 등의 다양한 요인에 의한 전단거동에 대한 해석과 실험적 평가가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국연구재단(NRF)이 지원하는 2014년도 이공분야기초연구사업(과제번호 : 2013R1A1A2006697)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Concrete Design Code", Korea Concrete Institute, 2012, p.170.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-14) and Commentary(ACI 318R-14)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, p.434.
3. Comete European de Normalisation(CEN), "Eurocode 2 : Design of Concrete Structures. Part 1-General Rules and Rules for Buildings", prEN 1992-1, 2002, p.211.
4. CSA Committee A23.3-04, Design of Concrete Structures for Buildings CAV3-A23.3-04, Canadian Standards Association, Canada, 2004, p.232.
5. Bazant, Z. P., and Cao, Z., "Size Effect of Shear Failure in Prestressed Concrete Beams", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.83, No.2, 1986, pp.260-268.
6. Wolf, T. S., and Frosch, R. J., "Shear Design of Prestressed

- Concrete : A Unified Approach”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.133, No.11, 2007, pp.1512-1519.
7. Elzanaty, A. H., Nilson, A. H., and Slate, F. O., “Shear capacity of prestressed concrete girders using high-strength concrete”, *ACI Journal*, Vol.83, No.3, 1986, pp.359-368.
  8. Nakamura, E., “Shear Database for Prestressed Concrete Members”, Master of Science in Engineering Thesis, The University of Texas at Austin, 2011, p.86.
  9. Lee, J. Y., and Hwang, H. B., “Maximum Shear Reinforcement of Reinforced Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, Vol.107, No.5, 2010, pp.580-588.
  10. Lee, J. Y., and Choi, I. J., “Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Stirrups”, *ACI Structural Journal*, Vol.108, No.5, 2011, pp.621-629.
  11. Regan, P. E., and Baker, A. L. L., “Shear Failure of Reinforced Concrete Beams”, *ACI Journal*, Vol.68, No.10, 1971, pp. 763-773.
  12. Sozen, M. A., and Zwoyer, E. M., “Investigation of Prestressed Concrete for Highway Bridge, Part 1-Strength in Shear of Beams without Web Reinforcement”, Engineering Experiment Station Bulletin, No. 452, University of Illinois, Urbana, 1959, p.69.
  13. ACI Committee 224, “Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01)”, American Concrete Institute, Detroit, 2001, p.46.

**요 약** 현재, 국내외 전단 설계기준에서 RC 및 PSC 부재의 전단보강철근의 최대항복강도를 제한하고 있다. 이는 고강도 전단보강철근을 사용한 RC 부재의 전단거동평가에 대한 선행 연구들에 근거한 것이다. 이에 비해 고강도 전단보강철근을 사용한 PSC 부재의 전단거동평가에 대한 연구는 미흡하며, PSC 부재는 긴장력에 의한 축압축력에 의해 RC와는 다른 전단거동을 나타내므로 국내 기준에 대한 검증이 필요하다. 또한 이러한 제한으로 인해 고강도 철근을 PSC 부재에 적용할 경우 강도의 추가적인 상승분을 내력에 포함시킬 수 없어 고강도 재료의 사용을 저해시키는 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 총 8개의 고강도 재료를 사용한 포스트텐션 PSC 보 전단실험을 실시하여 KCI-12 기준 및 ACI 318-14 기준의 항복강도 및 사인장균열의 폭을 검토하였다. ACI 318-14에서 요구하는 전단보강철근의 항복강도 제한값(420 MPa) 이상인 모든 PSC 실험체의 전단보강철근이 항복한 이후에 최대 내력에 도달하였으며, 실험 전단내력 또한 KCI-12 기준식의 전단강도 이상인 것으로 나타났다. 사용성 측면에서도 고강도 전단보강철근을 사용한 모든 실험체가 ACI 224위원회의 허용 균열폭(0.41 mm)을 초과하지 않았다. 본 연구의 실험결과에 근거하여 KCI-12 기준에서 제한하는 전단보강철근의 항복강도는 PSC 부재에 대해서 전단내력 및 균열의 사용성 측면을 모두 만족하는 것으로 판단되며 ACI 318-14의 전단보강철근 제한 기준은 다소 안전측에 속하는 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 전단보강철근 항복강도, 고강도, 프리스트레스트 콘크리트 보, 사인장균열, 전단 설계