

# 개구부가 있는 강판콘크리트 벽체의 압축특성 분석

## Analysis of Compression Characteristics of the Steel Plate-Concrete Wall Structures with Openings

최 병 정<sup>1)</sup>

Choi, Byong Jeong

**요 약 :** 본 연구는 SC 벽체의 구조적 성능에 개구부가 주는 영향을 평가하는 목적으로 하였다. SC구조의 실험체는 개구부가 있는 실험체와 없는 실험체로 구분하였으며 개구부형상은 정사각형으로 개구부 주변의 보강과 비보강 그리고 슬리브두께를 변수로 계획하였다. 실험체의 공통된 파괴양상은 강판의 좌굴이 스티드와 스티드 사이에서 발생한 후 콘크리트의 균열이 진행되는 형태이며 개구부의 파괴형태는 수직 슬리브 벽이 개구부 안쪽으로 좌굴되는 파괴형태를 보여주었다. 또한 개구부의 슬리브 유무에 따라 강판좌굴 하중은 비슷하지만 최대압축강도는 슬리브가 있는 것이 크게 나타났다.

**ABSTRACT :** The objective of this study is to investigate the effect of the openings on the structural behavior of SC walls. The test parameters were with or without the reinforcing of openings and sleeve thickness. The common failure showed that the crack in the concrete progressed with the plate's local buckling between the shear connectors. The failure of the openings showed that the vertical wall of the sleeve buckled toward the opening inside. The plate buckling load showed a similar value with or without the sleeve of the opening, respectively. However, the maximum compressive strength of the specimen without the opening was higher than that of specimen with the opening.

**핵심 용어 :** 강판콘크리트, 벽체, 개구부, 좌굴, 판좌굴

**KEYWORDS :** steel plate concrete, wall, opening, buckling, plate buckling

### 1. 서론

최근 건축 구조물은 고층화·대공간화 되면서 고강도 강재 및 콘크리트를 사용하고 있으며 또한 기존 구조재료를 합리적으로 합성하여 작은 단면을 갖고도 더 큰 하중을 지지할 수 있는 합성구조 부재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(최병정 등, 2008). 강판과 콘크리트의 합성구조는 콘크리트의 취성파괴 및 강판의 좌굴이 어느 정도 방지되며 이에 대한 연구사례로는 SRC(Steel Framed Reinforced Concrete, 이하 SRC)기둥, CFT(Concrete Filled Steel Tube, 이하 CFT)기둥 및 SC(Steel Plate-Concrete, 이하 SC)구조가 있다(한홍수, 2008). 특히 강판과 콘크리트를 합성하여 만든 SC구조는 대부분 형상이 정사각형인 CFT기둥과 비교하여 자유로운 단면형상을 가질 수 있으며, 벽체요소로서도 사용이 가능하다. 이에 원전구조물 모듈화공법(SC구조) 기술개발을 위해 많은 연구와 실험이 진행되었으며 특히 실험을 통한 연

구사례로는 폭두께비에 따른 강판콘크리트구조의 압축거동(한홍수 등, 2011), 리브 보강 유무에 따른 강판-콘크리트 구조의 압축거동(최병정 등, 2009) 등이 있다. 기존 연구의 공통된 목적은 압축부재의 최대압축강도 및 파괴형상을 확인하고 판폭두께비(스티드간격/강판두께,  $B/t$ )에 따른 실험체의 초기강성이 어떻게 변하는지 알아보고 강판좌굴 및 유효좌굴길이계수에 미치는 영향을 파악하였다. 하지만 실제 벽체요소와 같이 다양한 설비배관위해 설계하는 슬리브는 벽체단면손실로 인한 응력집중현상 문제로 복잡한 원전설비의 배관이 지나가는 개구부의 안전성을 파악할 필요성이 있으며 보강방법에 대한 연구가 필요하다(이승준 등, 2009).

따라서 본 연구의 목적은 USC(Unsiffened SC)구조에 개구부형상 및 보강방법에 따른 변수로 실험체에 중심압축하중을 가력한 후 실험체의 파괴양상, 강판의 좌굴, 측면위량 및 최대압축강도 등을 비교·분석하여 개구부가 있는 이질합성 강판콘크리트의 압축거동 특성을 파악하고자 한다.

1) 교신저자. 경기대학교 플랜트·건축공학과 교수, 공학박사, P.E.  
(Tel: 031-249-9702, Fax: 031-249-9702, E-mail: bjchoi@kyonggi.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 개요

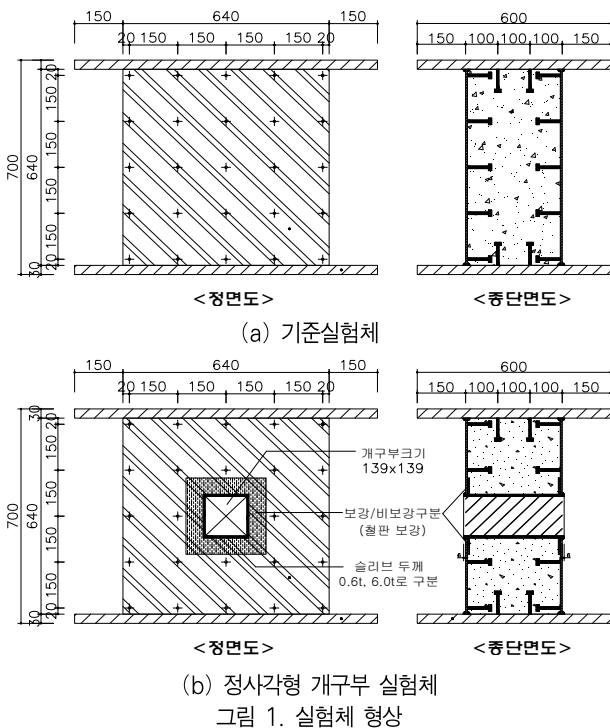
본 실험에서 그림1과 같이 개구부는 정사각형으로 실험체를 제작했으며 개구부 실험체의 실험값을 비교하기 위해 기준 실험체를 제작하였다. 각 실험체의 세부일람은 표 1과 같다.

표 1. 실험체 일람표

No.	실험체명	B/t	f <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	실험체크기 (mm)			개구부 형상	개구부 보강	슬리브 크기
				두께	폭	높이			
0	기준실험체	25	26.6	300	640	640	없음	없음	없음
1	NSNR/R-25	25	26.6	300	640	640	정사각형	무보강	0.6t
2	SNR/R-25	25	26.6	300	640	640	정사각형	무보강	6.0t
3	NSR/R-25	25	26.6	300	640	640	정사각형	보강	0.6t
4	SR/R-25	25	26.6	300	640	640	정사각형	보강	6.0t

\* NS=Non Sleeve, NR=Non Reinforced, S=Sleeve, R=Reinforced

각 실험체는 벽두께 300mm, 폭 640mm, 높이 640mm를 동일하게 적용하여 그림1과 같이 제작하였다. 실험에 사용한 강판두께는 6mm이며 강재가 비탄성 영역에서 좌굴하도록 각 실험체의 B/t는 25로 일정하게 계획하였으며, 스티드의 크기는 KEPIC-SNG에서 제안하고 있는 축직경 8Φ, 8d<sub>b</sub>이상으로 길이를 71mm로 계획하였다.



개구부의 보강유무, 슬리브크기에 따른 압축강도를 비교하고 슬리브크기와 보강유무에 따른 효과를 검토하기 위한 것이다. 개구부의 보강방법은 기존 공제된 단면적 만큼 철판을 덧대어서 용접하여 보강하는 방식을 따랐으며 강판의 두께는 6mm이다.

### 2.2 가력 및 측정방법

실험체의 가력은 10,000kN U.T.M.(Universal Test Machine)을 사용하였으며 그림 2와 같이 1방향으로 단조가력을 실시하였다. 이때 실험체에 발생하는 편심이 발생하지 않도록 하기 위해 사전에 예상최대압축강도의 10%정도 이하의 탄성범위 내에서 예비가력을 실시하였다. 예비가력은 양끝 모서리에 설치된 4개의 LVDT(Linear Variable Differential Transfomer)가 거의 동일한 변위로 관측될 때 본가력을 실시하였다. 또한 구형의 가력점에서 실험체 상부의 가력판을 통해 하중이 실험체에 일정하게 전달되게 하기 위해 상부 가력판 두께를 크게 하였다.

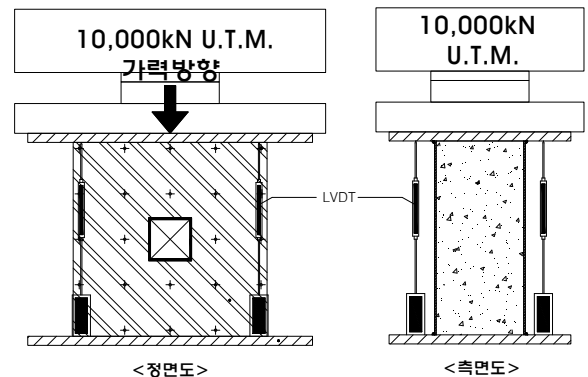


그림 2. U.T.M.과 실험체

연직방향으로 작용하는 압축하중에 의한 실험체의 구조적 거동 관찰 및 압축하중에 의한 실험체의 측면위를 관측하기 위해 실험체 모서리 4군에 LVDT를 설치하였으며 개구부 주위에서 콘크리트의 변형률이 0.003을 초과하여 콘크리트가 극한상태에 도달하였는지 확인하기 위해 스티드와 스티드 사이에 1개씩 총 4개의 매립형 콘크리트용 스트레인게이지를 설치하였다. 그리고 개구부 주변에 응력이 집중될 것으로 판단되어 개구부 주변 스티드에 스트레인 게이지를 설치하였으며 스티드의 인장거동을 확인하기 위해 게이지를 전면 및 후면 스티드에 6개씩 총 12개를 설치하였다. 또한 강판의 좌굴을 관측하기 위해 강판의 좌굴이 예상되는 스티드와 스티드 사이에 게이지를 1개씩 설치하였으며 개구부 주위 90도 방향에 1개씩 설치하였다. 이로서 강판에 설치한 스트레인 게이지는 전면과 후면에 12개씩 총 24개를 설치하였다.

정사각형 개구부의 크기는 139mm이고 실험체는 개구부 보강유무, 슬리브크기(0.6t, 6.0t)로 구분된다. 이는 정사각형

### 2.3 재료 물성치

콘크리트의 압축강도는 표 2와 같으며 강재와 스티드의 항복강도는 표 3 및 표 4와 같다. 콘크리트 설계기준강도가 24MPa가 되도록 하였지만 공시체의 콘크리트 압축강도는 26.6MPa로 나타났다. 또한 SM490 강재의 인장강도 시험결과 항복강도는 302.49MPa로 예상 항복강도 보다 약 22.5MPa 적게 나타났다. 이는 강재의 두께에 따른 문제로 판단되며 이에 기준식에 의한 실험체의 압축강도 계산시 콘크리트 압축강도는 26.6MPa로 강재의 항복강도는 302.49MPa를 적용하였다.

스티드(8Φ)의 항복강도는 421MPa로 나타났으며 항복비율은 86%, 연신율은 22%로 나타났다.

표 2. 콘크리트의 압축강도 시험결과 및 배합비

콘크리트 설계기준강도 (N/mm <sup>2</sup> )	압축강도 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (mm)	슬립프 (%)	단위골재량(kg/mm <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
24	26.6	47.3	150	160	359	529	350

※ W=Water, C=Cement, S=Sand and G=Gravel

표 3. 강재의 인장강도 시험결과

강종	두께	항복강도	인장강도	탄성계수	항복비율	연신율
	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )			(%)	
SM490	5.75	305.71	446.91	190,716	68.40	37.17
	5.72	296.91	439.27	195,373	67.59	37.55
	5.63	301.70	444.55	200,030	67.87	29.84
평균	5.7	302.49	447.46	2.0×10 <sup>5</sup>	67.94	34.85

표 4. 스티드의 인장강도 시험결과

종류	지름	항복강도	인장강도	탄성계수	항복비율	연신율
	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )			(%)	
Φ-8	8	421	492	2.0×10 <sup>5</sup>	86	22.0

### 3. 강판콘크리트 구조의 기준식

실험값의 비교·분석을 위해 기준식으로는 일본의 JEAG 4618-2005와 국내기준인 KEPIC-SNG를 사용하였다.

### 3.1 JEAG 4618-2005

강판과 콘크리트로 이루어진 합성구조의 공칭압축강도( $P_n$ ) 산정시 제안식은 콘크리트의 압축강도와 강판의 압축강도를 누가하는 방식으로 산정하였으며, 기준식은 식(1)과 같다.

$$P_n = F_{cr}A_s + f_{ck}A_c \quad (1)$$

JEAG 4618-2005에 의하면 강판의 압축강도는 강판의 좌굴 강도에 따라 달라지며 식(2)와 같이 스티드로 점지지된 강판의 좌굴이 탄성영역에서 좌굴하는지 판별한 후 강판 좌굴 강도( $F_{cr}$ )를 산정한다.

$$\frac{B}{t} \leq \frac{600}{\sqrt{F_y}} \quad (2)$$

식(2)는 오일러의 탄성좌굴에 기초한 식(3)에 의해 강재 탄성계수( $E_s$ )와 스티드로 횡지지된 강판의 유효좌굴길이계수( $K$ )를 대입하여  $B/t$ 로 정리한 것과 같다. 또한 식(2)의 산정을 위해  $F_y = \frac{\pi^2 E}{12K^2(B/t)^2}$  에  $E=200,000$ (MPa),  $K=0.7$ 을 대입한다. 따라서 식(2)의  $B/t$ (스티드간격/강판두께, 이하  $B/t$ )가  $600\sqrt{F_y}$ 보다 크면, 강판은 탄성 좌굴하여 강판 좌굴강도( $F_{cr}$ )는 식(3)의 탄성좌굴강도( $F_e$ )이다. 그러나  $B/t$ 가  $600\sqrt{F_y}$ 보다 작으면, 강판은 비탄성 좌굴하여 강판 좌굴강도( $F_{cr}$ )는 강판 항복강도와 같다.

$$F_e = E_s \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} \quad (3)$$

### 3.2 KEPIC-SNG

KEPIC-SNG기준은 2009년 대한전기협회에서 인증한 국내 표준이다. 이는 일본의 JEAG 4618의 설계식을 일부 수정하여 독자적인 연구를 바탕으로 제안한 설계식이다. 본 기준식은 콘크리트의 크기효과 및 장기 강도 저하를 고려하기 위해 콘크리트의 압축강도를  $1.0f_{ck}$ 에서  $0.85f_{ck}$ 로 수정하였으며 H형강리브로 보강 유무에 따른 NSC(비보강), SSC(보강)구조의 압축강도를 구분하였다. 기준식은 식(4)부터 식(10)과 같다(SNG 4.2).

$$P_u \leq \phi P_n \quad (4)$$

여기에서  $P_e \geq 0.44P_0$ 인 경우,

$$P_n = \left[ 0.658 \frac{P_0}{P_e} \right] P_0 \quad (5)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{(K_w L)^2} \quad (6)$$

$$EI_{eff} = E_s I_p + (0.6 + 2\rho_s) E_c I_c \quad (7)$$

$$P_0 = 2A_p F_{cr} + 0.85A_c f_{ck} \quad (8)$$

또한  $P_e < 0.44P_0$ 인 경우,

$$P_n = 0.877P_e \quad (9)$$

$P_0$ 에서 ( $F_{cr}$ )은

$$F_{cr} = (1.5 - 0.043 \frac{K_p B}{t_p} - 90\epsilon_n) F_{yp} < F_{yp} \quad (10)$$

탄성좌굴 압축강도( $P_e$ )는 식(6)과 같다. 탄성좌굴강도( $P_e$ )가  $0.44P_0$ 보다 크거나 같을 때 식(5)를 적용하여 공칭 압축강도( $P_n$ )를 계산하며, 작을 때 식(9)를 적용하여 공칭 압축강도( $P_n$ )를 산정한다. 본 연구에서는 식(8)의  $P_0$ 를 사용하여 공칭압축강도를 살펴보고자 하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 최대압축강도

최대압축강도 도달시 실험체의 일반적인 파괴양상은 강판의 좌굴이 발생한 후 콘크리트의 균열이 발생되어 진행되는 형태이며 강판의 좌굴 위치는 스테드와 스테드 사이에서 발생하였다. 개구부가 없는 실험체의 경우 강판은 최대압축강도에 도달하기 전에 스테드와 스테드 사이에서 좌굴하고 스테드는 강판에서 1~2개 정도 분리되며 콘크리트는 일부구간에서 균열 또는 박리현상이 나타난 후 최대압축강도에 도달하였다. 개구부가 있는 실험체의 경우 개구부가 없는 실험체와 마찬가지로 비슷한 파괴양상을 보이며 수직 슬리브 벽이 개구부 안쪽으로 좌굴되는 파괴형태가 나타났다.

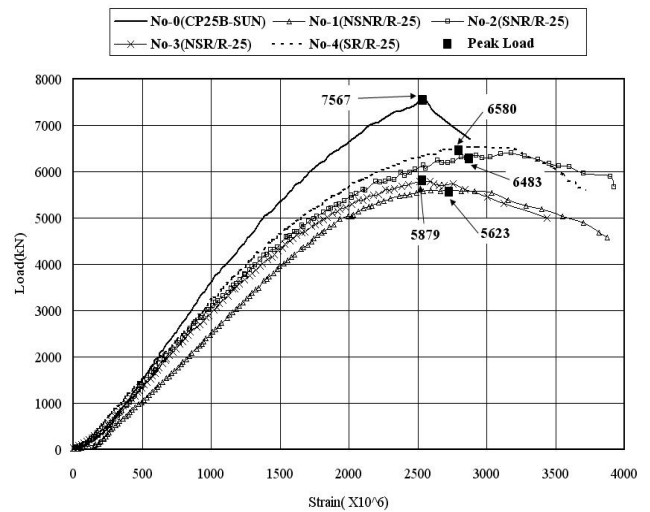


그림 4. 실험체별 하중-변형률 곡선(LVDT)

그림 3은 실험체별 하중-변형률 곡선이며 각 실험체의 최대압축강도는 축변형률이 0.0025~0.003범위에서 도달하는 것으로 나타났다. 또한 축변형률이 약 0.002까지는 하중-축변형률 곡선이 선형이지만 0.002이후 부터는 하중-축변형률 곡선이 비선형으로 나타났다. 표 6은 실험체별 변수에 따른 최대압축강도를 비교한 것으로 슬리브 두께를 확보하는 것이 단면적 확보를 통한 보강보다는 내력증대 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

표 5. 시험체별 변수에 따른 최대압축강도 비교

고정변수	슬리브		고정변수	강판보강	
	0.6t	6.0t		보강	무보강
보강	No.1 vs No.2		슬리브 0.6t	No.1 vs No.3	
최대하중(kN)	5,623	6,483	최대하중(kN)	5,623	5,879
무보강	No.3 vs No.4		슬리브 6.0t	No.2 vs No.4	
최대하중(kN)	5,879	6,580	최대하중	6,483	6,580
10~13% 내력증대			1.0~4.5% 내력증대		

표 6. 실험체별 최대압축강도 비교(kN)

No.	실험체명	실험값	이론값		비교	
			JEAG 4618	KEPIC-SNG	C/D	C/E
A	B	C	D	E	F	G
0	기준실험체	7,567	7,122	5,877	1.06	1.28
1	NSNR/R-25	5,623	5,542	4,573	1.02	1.22
2	SNR/R-25	6,483	6,576	5,608	0.98	1.15
3	NSR/R-25	5,879	5,888	4,924	0.99	1.19
4	SR/R-25	6,580	6,922	5,958	0.95	1.10
평균치		-	-	-	1.0	1.19
표준편차		-	-	-	0.04	0.07

표 6은 실험체별 최대압축강도를 기준식과 비교한 것이다. 실험값에 대한 JEAG4618의 이론값의 비는 0.95~1.06이고 평균치는 1.0 표준편차는 0.04이며 KEPIC-SNG에 의한 비는 1.10~1.28 표준편차는 0.07이다. 이는 일본식에 비해 안전측이 10%~28%로 KEPIC-SNG의 식이 안전함을 알 수 있으며 개구부에 따른 단면손실을 고려하여 계산된 이론값은 콘크리트의 비균질성을 보정하기 위한 계수값이 반영된 KEPIC-SNG의 식이 JEAG-4618식에 비해 보수적인 것으로 판단된다.

### 4.2 강판좌굴분석

표 7은 강판좌굴시 압축강도, 최대압축강도 및 강판좌굴시 압축강도를 나타내고 있으며 그림 4부터 그림 8까지 각 실험체별 하중-변형률 곡선이다. 각 실험체의 파괴양상은 스트레인 게이지 값과 육안관찰을 통해 확인하였다.

표 6에서 기준실험체는 최대압축강도에 대한 강판좌굴시 압축강도는 약 88%이며 개구부가 있는 실험체의 경우 61%~89%로 나타났으며 그림 6과 그림 8에서 개구부의 슬리브 유무에 따라 강판좌굴 하중은 비슷하지만 최대압축강도는 슬리브가 있는 것이 크게 나타났다.

표 7. 강판좌굴시 압축강도 비교(kN)

No.	실험체명	최대압축강도 $P_{max}$	강판좌굴시 압축강도 $P_{buckling}$	$P_{buckling}/P_{max}$
col(1)	col(2)	col(3)	col(4)	col(5)
0	기준실험체	7,567	6,717	0.88
1	NSNR/R-25	5,623	5,050	0.89
2	SNR/R-25	6,483	4,494	0.69
3	NSR/R-25	5,879	3,326	0.56
4	SR/R-25	6,580	4,024	0.61
평균치		-	-	0.73
표준편차		-	-	0.14

이를 요약하면 기준실험체 경우 그림 4과 같이 최대압축강도 도달하기까지 강판좌굴에 대한 변형률이 탄성범위에서 일정하게 나타났으며 개구부가 있는 실험체는 개구부 주위의 변형이 급격하게 일어나면서 좌굴하는 비슷한 경향의 파괴양상을 보여주었다. 이는 보강유무, 슬리브두께와 관계없이 비슷한 양상이었다.

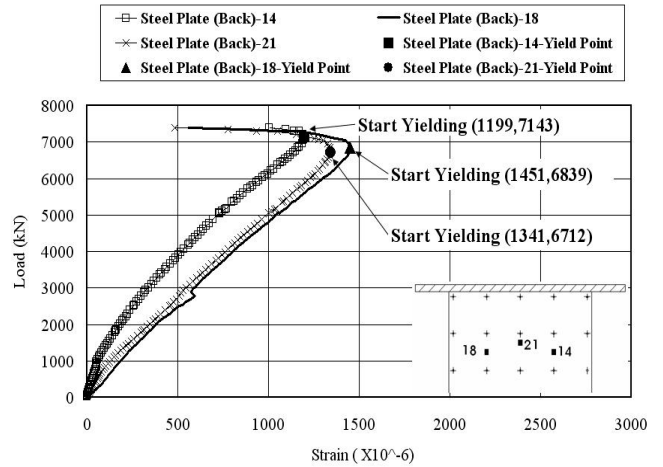


그림 4. No.0 기준실험체 하중-변형률 곡선(강판)

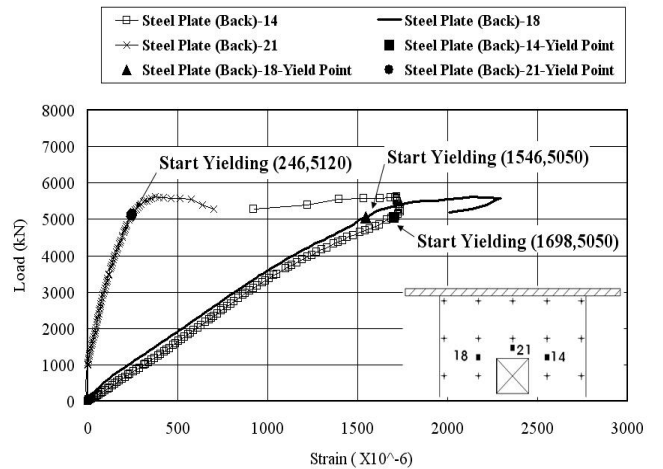


그림 5. No.1 NSNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 0.6t)

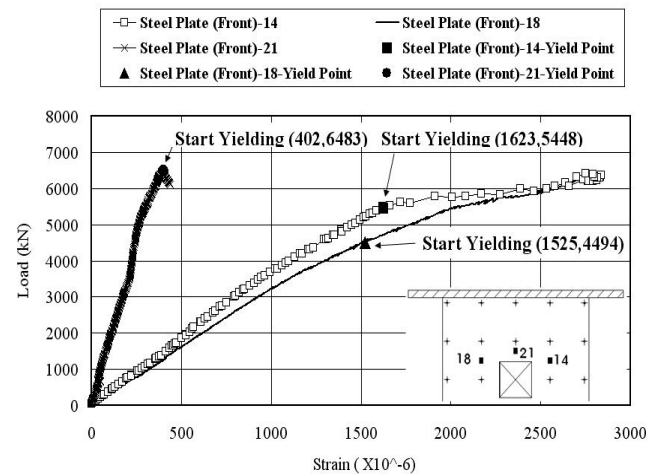


그림 6. No.2 SNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 6.0t)

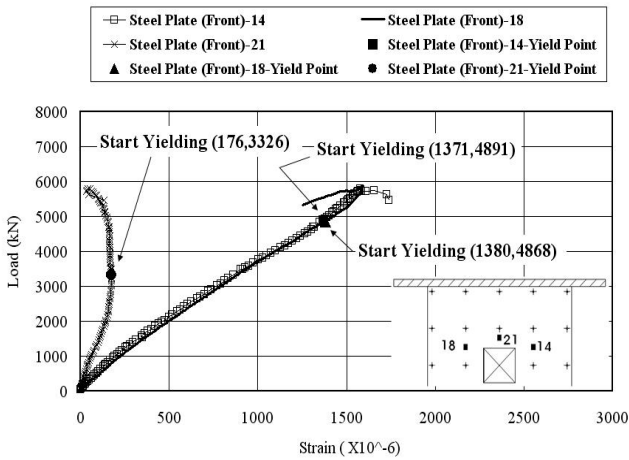


그림 7. No.3 NSR/R-25 (보강, 슬리브두께 0.6t)

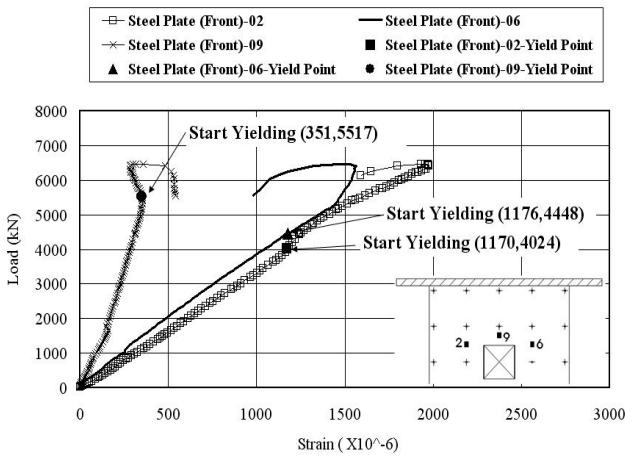


그림 8. No.4 SR/R-25 (보강, 슬리브두께 6.0t)

#### 4.2.1 기둥이론을 적용한 표면강판의 좌굴분석

표면강판의 좌굴강도를 검토하는데 있어 기둥의 좌굴이론을 적용한 공식은 오일러 좌굴 이론에 근거한 공식으로 오일러 좌굴식은 식(11)과 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2} \quad (11)$$

오일러 좌굴식을 이용하여 기둥좌굴이론을 적용한 공식을 유도할 수 있는데 이를 유도한 것은 식(12)와 같다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12K^2(B/t)^2} \quad (12)$$

이를 변형률로 치환하여 식을 정리하면 식(13)과 같다.

$$\epsilon_{cr} = \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} \quad (13)$$

미국의 하중저항계수설계법(AISC/LRFD, 2005)의 좌굴강도식의 유도는 휨좌굴 강도는 식(14)와 식(15)에 의해 결정된다.

$$\textcircled{1} \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ 또는 } F_e \geq 0.44F_y \text{ 인 경우}$$

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (14)$$

$$\textcircled{2} \frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ 또는 } F_e < 0.44F_y \text{ 인 경우}$$

$$F_{cr} = \left( \frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (15)$$

여기에서 세장변수  $\lambda_c$  는 식(16)과 같으며 SC구조의 스테드간격비(B/t)를 적용하기 위하여 다음과 같이 유도하였다.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{KL}{r} \right)^2} \quad (16)$$

식(16)에  $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ ,  $l = B$ ,  $I = \frac{B \cdot t^3}{12}$ ,  $A = B \cdot t$  을 대입하여 정리하면 식 (17)과 같이 정리된다.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{12K^2 \left( \frac{B}{t} \right)^2} \quad (17)$$

LRFD 강판좌굴곡선은 식(14), 식(15)를 이용하여 식(17)을 판폭두께비(B/t)별로 나타내고 식(13)을 이용하여 오일러 좌굴곡선을 그린다. 이를 이용한 실험체별 강판좌굴양상은 그림 9부터 그림 13까지 나타내었으며 유효좌굴길이 계수는 KEPIC-SNG에서 제시하는 0.5와 JEAG-4618에서 제시하는 0.7로 구분하여 도시하였다.

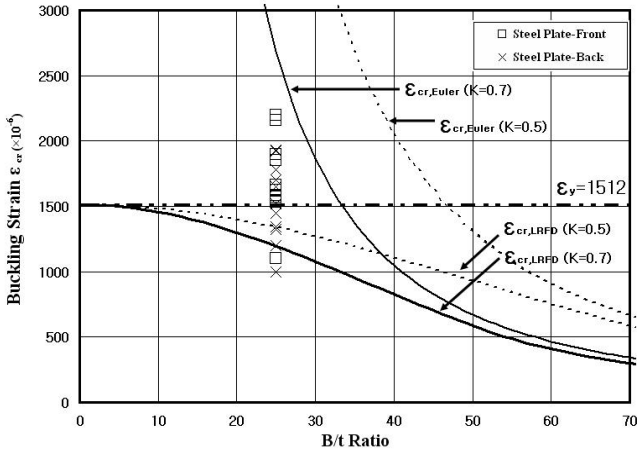


그림 9. No.0 기준실험체

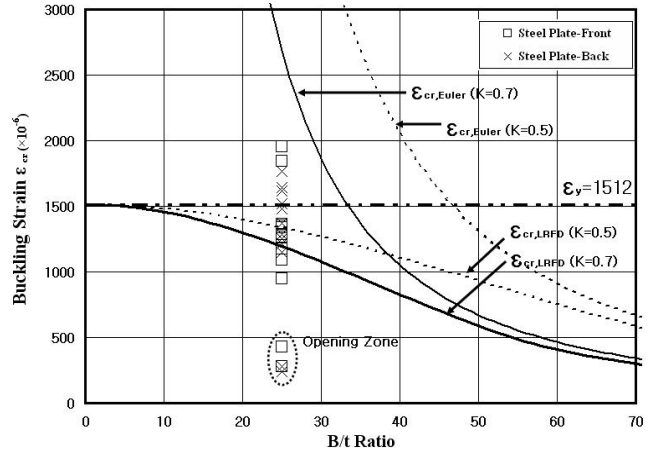


그림 11. No.2 SNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 6.0t)

그림 9에서 기준실험체의 강판좌굴은 오일러 좌굴식에는 미치지 못하나 LRFD에서 제시하는 좌굴에는 만족하는 것으로 나타났다. 개구부가 있는 실험체의 경우 대부분 오일러 좌굴식에는 미치지 못하는 결과나 나왔다.

또한 개구부 실험체의 경우 일부 구간에서 LRFD에서 제시하는 부분을 크게 하회하는 결과가 나타났다. 이는 개구부 주변의 응력집중으로 인해 최대하중 도달 전 개구부 주변에서 급격하게 변형이 일어나기 때문에 작은 변형률에서 강판이 좌굴한 것으로 보인다.

그림 10과 그림 12 그리고 그림 11와 그림 14를 비교해 개구부 보강 유무에 따른 실험체별 좌굴을 분석해 보면 보강에 대한 효과가 강판좌굴에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 하지만 슬리브 유무에 따른 효과는 보강유무 보다는 변형률 범위내에서 뚜렷한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 SC 구조의 개구부 보강과 관련하여 보강방법은 강판의 보강보다는 슬리브의 두께를 크게 하는 것이 좀 더 유리하다고 판단된다.

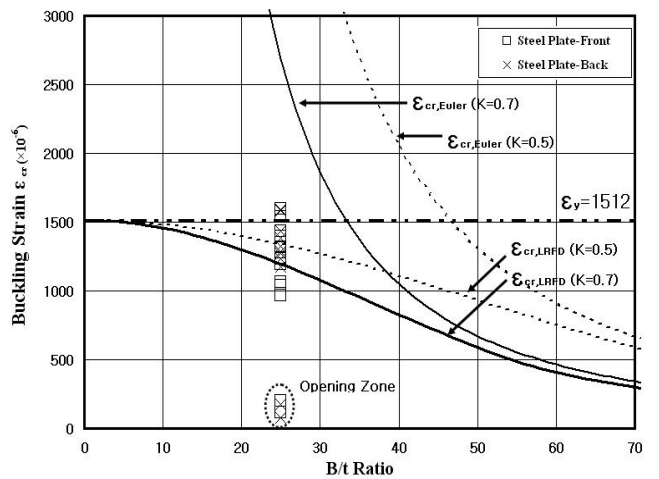


그림 12. No.3 NSR/R-25 (보강, 슬리브두께 0.6t)

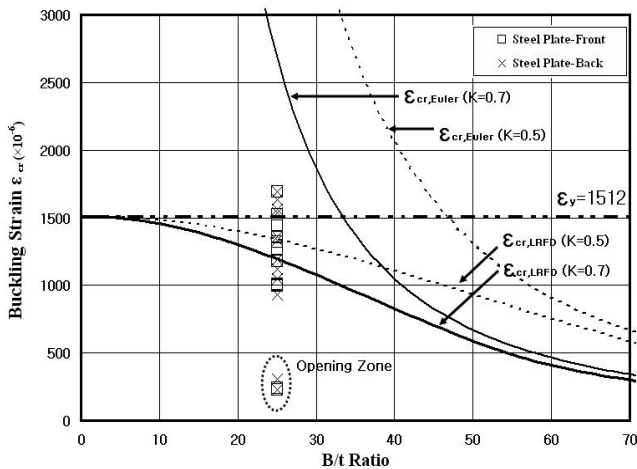


그림 10. No.1 NSNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 0.6t)

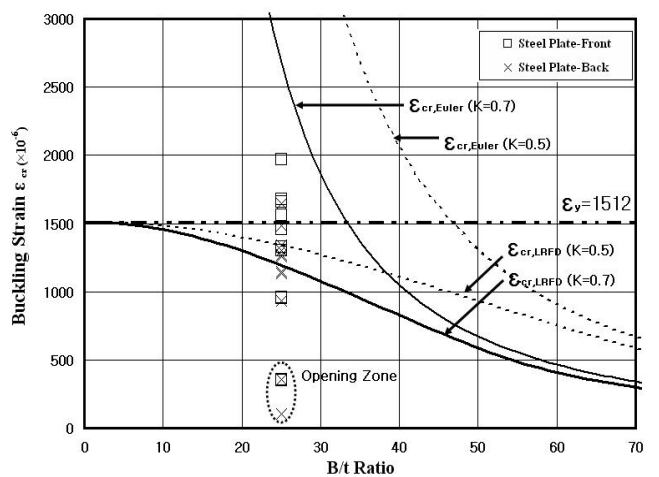


그림 13. No.4 SR/R-25 (보강, 슬리브두께 6.0t)

### 4.2.2 판이론을 적용한 강판좌굴분석

이론을 적용한 강판좌굴식은 지배방정식을 이용한 편미분을 통해 구할 수 있으며 판이론을 적용한 강판좌굴식은 식(18)과 같다(Stephen and James, 1961; Theodore Galambos, 1998).

$$\sigma_{crpl} = K_{pl} \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu^2)(B/t)^2} \quad (18)$$

식 (18)을 변형률로 치환하여 식을 정리하면 식 (19)와 같다.

$$\epsilon_{crpl} = K_{pl} \frac{\pi^2}{12(1-\nu^2)(B/t)^2} \quad (19)$$

여기에서 평판좌굴계수( $K_{pl}$ )은 일방향 압축을 받는 구형평판의 그림 14와 같이 좌굴경계조건을 양단 단순지지 된 것으로 가정하여 식 (20)를 유도하였다.

$$K_{pl} = \left(\frac{m}{\alpha}\right)^2 + 2n^2 + n^4 \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \quad (20)$$

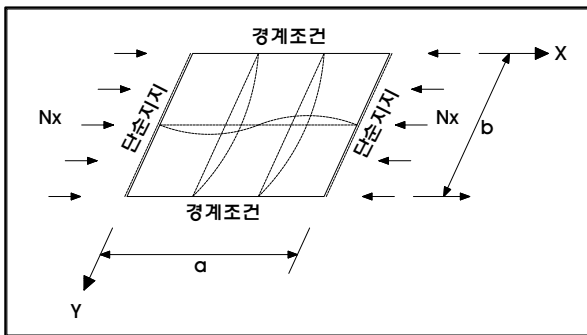


그림 14. 일방향으로 압축력을 받는 평판좌굴 (경계조건)

여기에서  $a$ 는 편판변장비로 좌굴모드에 따른 경계조건 길이를 단순지지된 길이를 나눈 값이다. 이 실험에서 스티드열과 스티드열 사이를 경계조건으로 가정하여 실험체의 폭으로 나눈 값이다. 따라서 실험에서 적용한 편판변장비는 0.234(스티드간격/실험체폭=150/640=0.234)이다. 또한 실험에서는 좌굴모드( $m$ )를 1로 선택하였다. 이는  $x$ 방향의 주기함수의 진동수( $m$ )를 1로 가정한 것이다. 그리고 식(21)에서  $y$ 방향의 주기함수의 진동수( $n$ )가 커지면 평판좌굴응력이 커지기 때문에 좌굴을 일으키는 가장 작은 평판좌굴응력을 구하기 위해  $n$ 값을 1로 가정한 것이다.

위 사항을 반영하여 판이론에 근거한 실험체별 강판좌굴 곡선은 그림 15부터 그림 19까지 도시하였다.

그림 15에서 기준실험체의 좌굴은 판이론에 범주한 좌굴곡선에 대부분 부합하는 것으로 나타났지만 판의 위치에 따라 일부 만족하지 못하는 결과를 보였다.

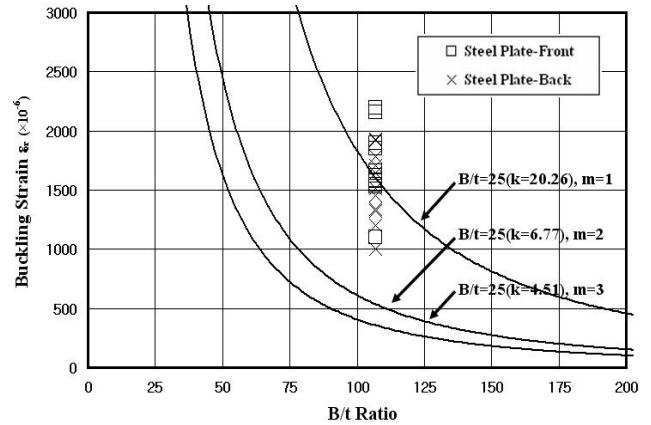


그림 15. No.0 기준실험체

또한 그림 16과 같이 개구부 실험체의 경우 대부분  $m=1$ 을 만족하지 못하는 결과를 보여준다. 하지만 그림 17과 그림 19는 슬리브 두께가 확보된 실험체(6.0t)로서 판이론에 근거한 좌굴곡선을 일부분 상회하는 모습이 관찰되었다. 이는 그림 16과 그림 18은 슬리브 두께가 0.6t로 보강유무에 관계없이 좌굴곡선을 하회하는 모습을 보이고 있어 개구부 주변의 보강보다는 슬리브 두께의 확보가 개구부 보강측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다.

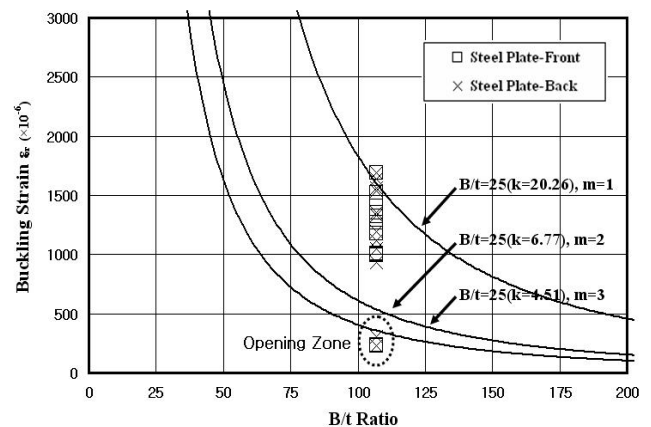


그림 16. No.1 NSNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 0.6t)



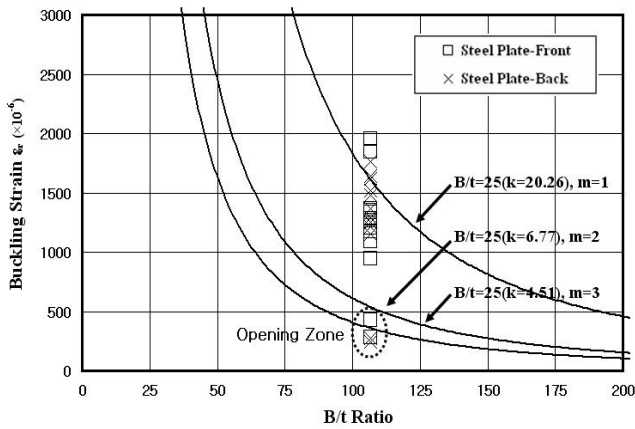


그림 17. No.2 SNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 6.0t)

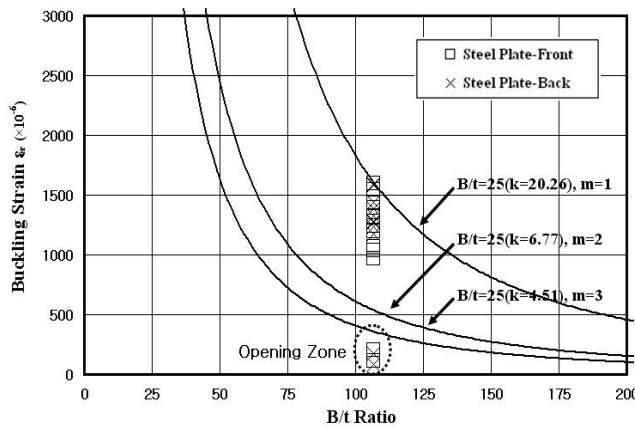


그림 18. No.3 NSR/R-25 (보강, 슬리브두께 0.6t)

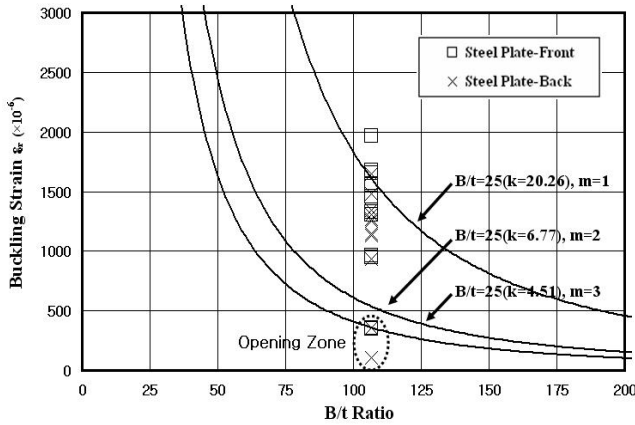


그림 19. No.4 SR/R-25 (보강, 슬리브두께 6.0t)

### 4.3 유효좌굴길이계수(K)

유효좌굴길이계수(K)는 기둥이론에 의한 강판좌굴강도의 식(13)을 이용하여 유도하였다. 이때 K값은 식(21)과 같다. 여기서, 강판의 변형률( $\epsilon$ )은 실험을 통하여 측정된 값을 사용하였다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2}{12\epsilon(B/t)^2}} \quad (21)$$

식(21)을 이용하여 강판 좌굴시 게이지 측정값을 대입하여 얻은 유효좌굴길이계수(K)값은 표 7과 같다.

표 8에서 기준실험체는 유효좌굴길이계수(K)값이 평균 0.87로 나타났으며 개구부 실험체의 경우 3번 실험체가 평균 2.30으로 유효좌굴길이계수 값은 강판을 덧대어서 보강한 실험체보다 슬리브 두께가 6t인 실험체가 크게 나타났다. 따라서 개구부 보강은 슬리브 두께를 확보하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

표 8. 실험체별 유효좌굴길이계수

No.	실험체명	기준값		전면강판		후면강판		평균	표준 편차
		JEAG	KEPIC	최대값	최소값	최대값	최소값		
0	기준실험체	0.7	0.5	0.92	0.78	0.99	0.82	0.87	0.09
1	NSNR/R-25	0.7	0.5	2.39	0.98	2.39	0.98	1.68	0.81
2	SNR/R-25	0.7	0.5	2.16	0.98	2.32	0.94	1.60	0.74
3	NSR/R-25	0.7	0.5	3.36	1.11	4.05	0.99	2.30	1.55
4	SR/R-25	0.7	0.5	1.93	1.16	3.55	1.07	1.90	1.14

### 4.4 표면강판 내부에 부착된 스티드의 인장력 분석

SC구조에서는 일정한 간격으로 스티드가 강판에 용접되며 스티드는 강판에서 전달되는 응력에 저항할 수 있는 거동을 하게 되는데, 이는 강판의 응력이 탄성영역이면 스티드는 전 단력을 받는 전단거동을 하고 강판의 응력이 점차 증가하여 강판이 콘크리트로부터 이격하기 시작하면 스티드는 인장거동을 하게 된다. 즉, 스티드와 스티드 사이의 강판이 밖으로 벌어지면서 스티드는 인장력을 받게 된다. 이때 스티드와 스티드 사이 강판에 작용하는 좌굴강도와 스티드 한 개당 작용하는 인장강도는 식(22) 및 식(23)과 같다.

$$P_{cr} = \epsilon_{cr} E_s B t \quad (22)$$

$$T_{st} = \epsilon_{st} E_{st} A_{st} \quad (23)$$

본 실험에서 강판의 좌굴강도는 강판의 전면과 후면에서 측정된 변형률( $\epsilon_{cr}$ )에 강판의 탄성계수( $E_s$ )를 곱한 후 강판의 단면적( $Bt$ )을 곱하는 과정으로 산정하였다.

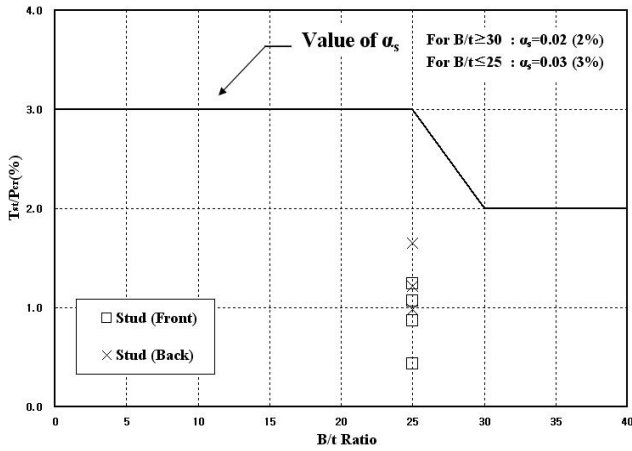


그림 20. No.0 기준실험체

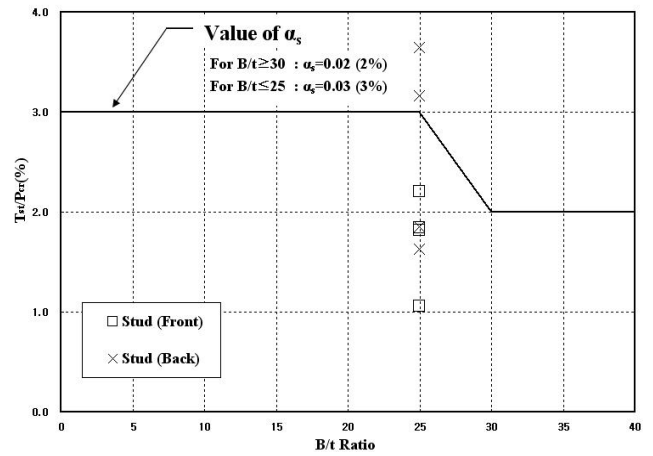


그림 23. No.3 NSR/R-25 (보강, 슬리브두께 0.6t)

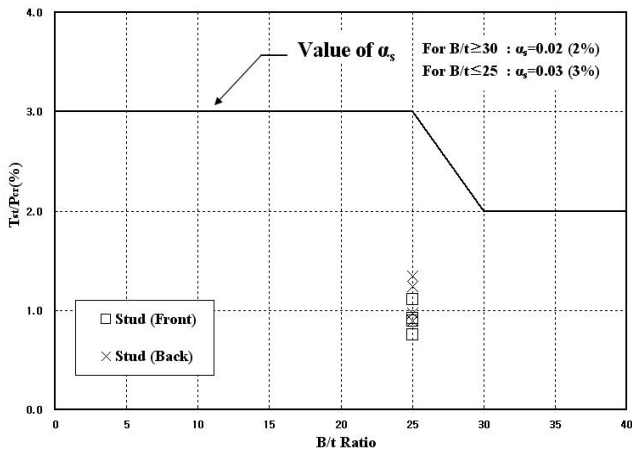


그림 21. No.1 NSNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 0.6t)

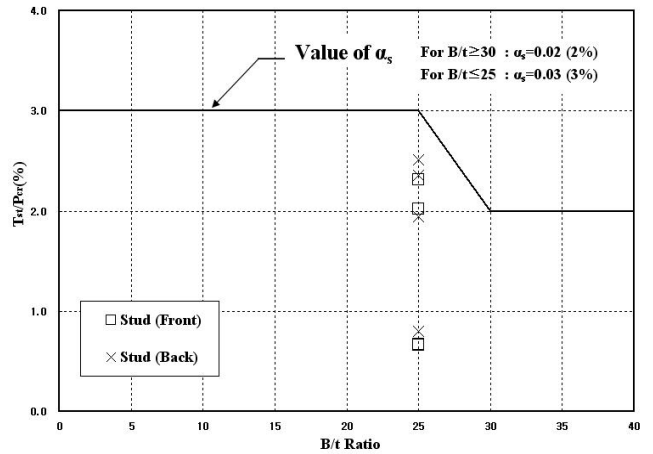


그림 24. No.4 SR/R-25 (보강, 슬리브두께 6.0t)

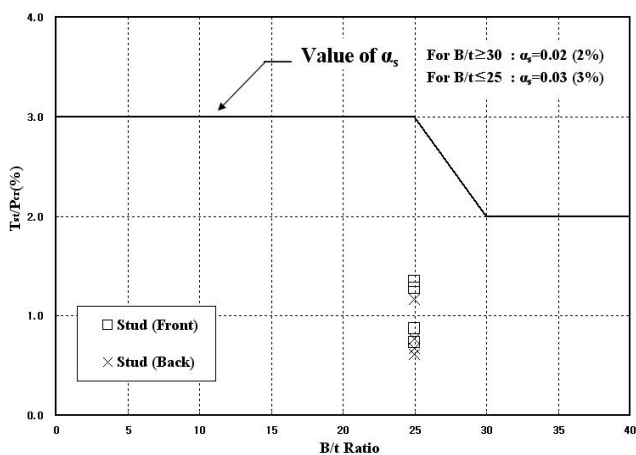


그림 22. No.2 SNR/R-25 (비보강, 슬리브두께 6.0t)

또한 스티드의 인장강도는 스티드의 몸통 표면에서 측정된 변형률( $\epsilon_{st}$ )에 스티드의 탄성계수( $E_s$ )를 곱한 후 스티드의 단면적( $A_{st}$ )을 곱하여 산정하였다. 여기서, 스티드와 강관의 탄성계수는 200,000(N/mm)을 사용하였다. 이를 적용하여 실험체별 스티드간격비-인장력 곡선은 그림 20부터 그림 24까지 구분하였다.

그림 22는 기준실험체 스티드간격비-인장력 곡선으로 B/t에 따른 강관의 좌굴강도에 의한 스티드 인장강도비( $T_{st}/P_{cr}$ )를 나타내고 있으며, 국내기준에서는 스티드간격비(B/t)가 30과 같거나 큰 경우에는 2%로 규정하고 있고 25보다 작거나 같은 경우에는 3%로 규정하고 있다(Value of  $\alpha_s$ ). 기준실험체의 경우 스티드에 작용하는 인장력은 강관의 좌굴강도중 약 0.4%~1.7%에 이르는 분포를 보이고 있다. 이는 일본 연구진에 의한 실험결과(Kanchi,1996)가 약 0.5%~3.5%의 범위인 것으로 보아 만족하지 못하는 결과이다.

## 감 사 의 글

이 논문은 2010학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- 대한전기협회(2010) 전력산업기술기준 강판콘크리트구조 (KEPIC-SNG).
- 이승준, 최병정, 강신균(2009) 개구부를 갖는 SC 벽체의 거동에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제3호, pp.233-243.
- 최병정, 한홍수, 김원기, 이승준, 김우범(2008) 스티드 간격과 강판두께의 비를 변수로 한 보강 강판-콘크리트 구조의 압축실험, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.549-559.
- 최병정, 한홍수, 김원기, 이승준, 김우범(2008) 스티드 간격과 강판두께의 비를 변수로 한 비보강 강판-콘크리트 구조의 압축실험, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.561-570.
- 최병정, 한홍수, 한권규, 이승준(2009) 리브 보강 유무에 따른 강판-콘크리트 구조의 압축거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.471-481.
- 한홍수, 최병정, 한권규(2011) 폭두께비에 따른 강판콘크리트구조의 압축거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.229-236.
- 한홍수(2008) H형강리브로 보강한 강판콘크리트(SC)구조의 압축거동, 경기대학교 박사학위논문.
- AISC (2005) Specification for Structural Steel Buildings.
- Galambos, T.V. (1998) Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 5th Ed., Wiley.
- JEAG 4618 (2005) Technical Guidelines for Seismic Design of Steel Plate Concrete Structures: for Buildings and Structures.
- Kanchi, M., Kitano, T., Sugawara, Y., and Hirakawa, K. (1996) Experimental Study on A Concrete Filled Steel Structure Part. 2 Compressive Tests (1), Architectural Institute of Japan Conference, pp.1071-1072.
- Shanmugam, N.E. and Lakshmi, B. (2001) State of the Art Report on Steel-Concrete Composite Columns, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57, No. 10, pp.1041-1080.
- Timoshenko, S.D. and Gere, J.M. (1961) Theory of Elastic Stability, 2nd Ed., McGraw- Hill.

또한 그림 25에서 일부 구간 만족하는 경우를 보이지만 그림23와 그림24 그리고 그림 26과 같이 2.0%미만의 낮은 결과값을 보여주고 있다. 따라서 강판의 좌굴발생과 항복이후의 좌굴범위 확대를 방지하기 위해 스티드의 인장력을 확보하는 방안으로 SC구조에서 콘크리트를 고강도로 설계하거나, 국내기준의 스티드 인장강도비( $T_{st}/P_{cr}$ )를 약 1.0%로 낮게 조정할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구는 USC(Unsiffened SC)구조에 개구부가 있는 부분을 고려한 연구의 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 실험체별 변수에 따른 최대압축강도를 비교한 결과 슬리브 두께를 확보하는 것이 단면적 확보를 통한 보강보다는 내력증대 측면에서 유리한 것으로 나타났다.
- (2) 실험값에 대한 최대압축강도는 이론값인 JEAG-4618의 95%~106% 범위에서 일치하였고 KEPIC-SNG는 110%~128% 범위에 있었다. 기준실험체의 경우 최대 압축강도에서 강판좌굴은 압축강도의 약 88%이고 개구부가 있는 실험체의 경우 61%~89% 범위를 보여주었다. 또한 개구부의 슬리브 유무에 따라 강판좌굴 하중은 비슷하지만 최대압축강도는 슬리브가 있는 것이 높게 나타났다.
- (3) 기둥이론을 적용하여 강판좌굴을 분석한 결과 보강에 대한 효과가 강판좌굴에는 큰 영향이 없는 것으로 판단되며 SC구조의 개구부 보강과 관련하여 슬리브의 두께를 크게 하는 것이 구조적 관점에서 유리하다고 판단된다. 판이론을 적용하여 강판좌굴을 분석한 결과 기준실험체의 좌굴은 판이론에 범주한 좌굴곡선에 대부분 부합하는 것으로 나타났다. 개구부 실험체의 경우 대부분  $m=1$ 의 좌굴곡선보다 낮은 결과가 나타났다. 따라서 SC벽체에 슬리브가 생기면 개구부 주변의 보강 또는 K값의 보수적인 적용(K값 증가)하는 것이 구조적 관점에서 안전할 것으로 판단된다.
- (4) 기준실험체의 경우 유효좌굴길이계수(K)는 평균 0.87로 나타났으며 개구부 실험체의 1.68~2.30 범위를 보여주었다.
- (5) 스티드 인장력 분석의 경우 스티드에 작용하는 인장력은 기준실험체가 강판의 좌굴강도중 약 0.4%~1.7%에 이르는 분포를 보이고 있으며 개구부 실험체의 경우 일부 구간에서 3.0%이상으로 만족하는 경우를 보이지만 대체로 2.0%미만의 낮은 결과값을 보여주었다.

부록, SYMBOLS

- |   |   |
|---|---|
| <p><math>A_c</math> : 콘크리트단면적(<math>mm^2</math>)</p> <p><math>A_p</math> : 한쪽면의 표면강판 단면적(<math>mm^2</math>)</p> <p><math>A_s</math> : 강판단면적(<math>mm^2</math>)</p> <p><math>A_{st}</math> : 스티드의 단면적(<math>mm^2</math>)</p> <p><math>B</math> : 스티드 연직간격(mm)</p> <p><math>E_c</math> : 콘크리트의 탄성계수(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>E_s</math> : 강재의 탄성계수(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>E_{st}</math> : 스티드의 탄성계수(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>E I_{eff}</math> : 벽체의 유효휨강성도(<math>N \cdot mm^2</math>)</p> <p><math>F_{cr}</math> : 강판좌굴응력(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>f_{ck}</math> : 콘크리트의 설계기준압축강도(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>F_e</math> : 탄성좌굴응력(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>F_y</math> : 강재의 항복강도(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>F_{yp}</math> : 표면강판의 설계기준 항복강도(<math>N/mm^2</math>)</p> <p><math>I_c</math> : 인장측 콘크리트를 무시하지 않은 콘크리트 단면2차모멘트(<math>mm^4</math>)</p> <p><math>I_p</math> : 양면 표면강판만의 단면2차모멘트(<math>mm^4</math>)</p> | <p><math>K_p</math> : 스티드로 횡지된 표면강판의 좌굴길이계수</p> <p><math>K_{pl}</math> : 평판좌굴계수</p> <p><math>L</math> : 벽체의 길이(mm)</p> <p><math>P_0</math> : 좌굴을 고려하지 않은 공칭압축강도(N)</p> <p><math>P_{cr}</math> : 강판의 좌굴강도(N)</p> <p><math>P_e</math> : 탄성좌굴 압축강도(N)</p> <p><math>P_n</math> : 공칭압축강도(N)</p> <p><math>P_u</math> : 설계압축강도(N)</p> <p><math>r</math> : 압축재의 단면2차반경(mm)</p> <p><math>t</math> : 강판의 두께(mm)</p> <p><math>T_{st}</math> : 스티드 한 개의 인장강도(N)</p> <p><math>t</math> : 표면강판의 두께(mm)</p> <p><math>\phi</math> : 압축강도감소계수(=0.65)</p> <p><math>\epsilon_n</math> : 공칭압축변형률(=0.002 <math>C_{cs}</math>)</p> <p><math>C_{cs}</math> : creep와 shrinkage를 고려한 계수</p> <p><math>\epsilon_{st}</math> : 스티드의 몸통 표면에서 측정된 변형률</p> |
|---|---|

(접수일자 : 2012. 1. 11 / 심사일 2012. 1. 16 /  
심사완료일 2012. 6. 1)