

# 스터드 간격과 강판두께의 비를 변수로 한 비보강 강판-콘크리트 구조의 압축실험

## Compression Tests for Unstiffened Steel Plate-Concrete Structures with Variation of B/t Ratio

최 병 정<sup>1)</sup> · 한 홍 수<sup>2)</sup> · 김 원 기<sup>3)</sup> · 이 승 준<sup>4)</sup> · 김 우 범<sup>5)</sup>

Choi, Byong Jeong Han, Hong Soo Kim, Won Ki Lee, Seung Joon Kim, Woo Bum

**요 약**: 본 연구는 강판-콘크리트로 이루어진 구조의 압축실험을 통해 압축강도 및 비탄성 파괴거동을 파악하기 위한 것이 주목적이다. 강판두께( $t$ )에 대한 스투드 간격( $B$ )비를 세가지(25, 33, 50)로 분류하였고, 이 세가지  $B/t$ 를 중심으로 하여 압축강도 실험을 실시하였다. 실험을 통해서 강판-콘크리트 구조의 압축강도는 콘크리트와 강재의 누가방식으로 예측하는 것이 타당하다고 판단되었다. 강판의 좌굴은 스투드 와 스투드 사이의 취약한 부분에서 비탄성국부좌굴이 발생함을 알 수 있었다. 그리고 압축하중 지배하의 비보강 SC 구조물에 대한 압축강도의 경험적 계산치가 제시되었다. 또한 좌굴 양상이 유한요소 분석의 결과와 비교되었다.

**ABSTRACT**: The primary object of the paper is to identify the compression forces and inelastic failure behavior using steel plate-concrete structures. The compression tests were carried out for the three types of B/ratios by 25, 33 and 50. The tests proved that the compressive strength of the SC structures can be estimated by the summation of strengths both of the steel plate and concrete. The buckling of the steel plates had been occurring at the plates between studs. The empirical estimation of compressive strength for unstiffened SC structures under compressive loadings was suggested. The buckling behavior was also compared with the results of the finite element analysis.

**핵심 용어**: 강판-콘크리트 구조, 강판두께비, 압축강도, 비탄성국부좌굴

**KEYWORD**: SC Structures, B/t ratio, Compressive Strength, Inelastic Local Buckling

### 1. 서론

최근 일본에서는 강재와 콘크리트를 합성하여 만든 SC 구조에 대한 압축, 휨, 평판전단, 접합부, 복원력 및 내화특성 등에 관한 실험이 완료되거나 진행 중에 있다. 상기 실험결과를 토대로 실제 건물에 적용할 수 있는지 검토하는 단계에 있다. 그 중에서 Kanchi와 Miyauchi 등에 의해 압축특성 실험이 실시되어 압축거동이 관찰되었고, 압축강도식이 제안되었다. 그러나 일본에서 연구한 압축 시험체의 수가 많지 않은 가운데, 이를 통한 압축강도식이 제시되었기 때문에 기존 일본식에 대한 재검증이 필요하였다. 또한 국내에서는 아직 SC 구조에 대한 실험적 연구가 진행되지 않았고, 체계적인

연구도 부족한 실정이다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 스투드로 점지된 강판콘크리트구조의 압축특성에 관한 실제 실험과 유한요소해석의 결과를 비교분석하여 시험체의 좌굴 거동과 최대압축강도, 강판두께( $t$ )에 대한 스투드 간격( $B$ )비(이하  $B/t$ )에 따른 강판항복강도와 강판좌굴, 압축력 작용시 강판을 통해 전달되는 스투드 응력거동 등을 살펴보고자 한다.

### 2. 이론적 고찰

SC구조의 압축재는 벽체두께( $T$ ) 및 강판두께( $t$ )의 비에 따라서 구조적 거동특성이 달라진다. 국내에서는 강재 단면적

1) 정회원, 경기대학교 건축공학과 부교수, 공학박사(bjchoi@kyonggi.ac.kr)  
2) 학생회원, 경기대학교 건축공학과, 박사과정(water1973@hanmail.net)  
3) 정회원, 호서대학교 건축공학과 교수, 공학박사(wonkikim@hoseo.edu)  
4) 교신저자, 정회원, 아주대학교 건축학부 교수  
(Tel. 031-219-2494, Fax. 031-219-2945, E-mail: sjlee@ajou.ac.kr)  
5) 정회원, 공주대학교 건축공학과 교수, 공학박사(wbk@kongju.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

이 총단면적의 3% 이상일 때 합성구조로 보고 있다. 기존의 합성구조가 각형기둥, 원형기둥에 콘크리트를 충전하는 형태로 사용되어 기둥과 보에 주로 사용되지만, SC구조는 합성구조의 제한적인 사용 이외에도 벽체, 기초 및 벽-바닥 접합부 등에 다양한 형태로 접합될 수 있는 장점이 있다. 하지만 압축하중을 받는 SC구조벽체의 압축강도에 관한 기준이 마련되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 SC구조와 유사하다고 판단되는 각종 합성구조(composite structure)의 압축강도식을(한병찬, 2001; 유영찬, 1997; 황원섭 등, 2002; 이승준 등, 2002; 서정환 등 2002) 우선 조사해 보았다.

국내의 기준은 KBC2005의 충전형 각형강관 합성기둥을 적용하였다(대한건축학회, 2005). 이때 합성기둥의 압축강도는 다음과 같은 절차에 의해 산정한다. 우선 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 수정탄성계수( $E_m$ )와 수정항복강도( $F_{ym}$ )를 구한 후 식 (3)에 대입하여 세장변수( $\lambda_c$ )를 산정한다. 이후 세장변수 크기에 따라 식 (4) 또는 식 (5)에 대입하여 좌굴강도( $F_{cr}$ )를 산정한다. 마지막으로 충전형 각형강관 합성기둥의 압축강도는 좌굴강도에 강재단면적을 곱하여 산정한다.

$$E_m = E_s + 0.4E_c \frac{A_c}{A_s} \quad (1)$$

$$F_{ym} = F_y + F_{yr} \frac{A_r}{A_s} + 0.6f_{ck} \frac{A_c}{A_s} \quad (2)$$

$$\lambda_c = \frac{kL}{r} \sqrt{\frac{F_{ym}}{\pi^2 E_m}} \quad (3)$$

$$\lambda_c \leq 1.5 \text{인 경우, } F_{cr} = 0.658^{\lambda_c^2} F_{ym} \quad (4)$$

$$\lambda_c > 1.5 \text{인 경우, } F_{cr} = \frac{0.877}{\lambda_c^2} F_{ym} \quad (5)$$

$$\Phi_c P_n = 0.85A_s F_{cr} \quad (6)$$

한편 강관콘크리트구조(SC Structure)의 압축특성에 관한 실험이 일본에서 진행되었다.(Kanchi et al, 1996 and Miyauchi et al, 1996). 상기 실험에서는 압축벽의 최대압축강도, 수축변형률, 판폭두께비에 따른 좌굴응력의 특성 및 스테드의 인장거동 등이 조사되었다. 상기 연구를 통해서 Kanchi 등은 압축강도식(JEAG4618, 2005)을 실험에 근거하여 식 (7)과 같이 제시하였다.

$$P_n = F_{cr}A_{si} + F_yA_{sf} + f_{ck}A_c \quad (7)$$

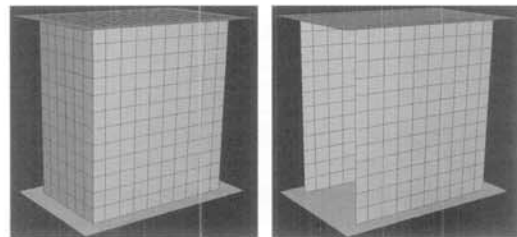
위의 연구에서는 SM 490 강재와 SS 400 강재를 사용하였다. 실험을 통한 SM 490 강재를 사용한 시험체의 최대압

축강도는 식 (7)과 같이 계산한 이론값과 잘 일치하는 패턴을 보였으나, SS 400 강재를 사용한 시험체의 최대압축강도는 이론값의 약 83%~87%에 이르는 결과로 나타났다. Kanchi et al, 1996). 한편 SM 490 시험체에서는 94%~105%에 이르는 결과로 나타났다. 따라서 SS 400 시험체에서는 강관의 재료적 특성에 의한 압축강도 저감인지만 시공 및 기타요인에 의한 압축강도 저감인지만 확인할 필요가 있다. 또한 식 (7)이 실무에서 보다 안전하게 사용될 수 있도록 하기 위해서 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

### 3. 유한요소 해석모델

#### 3.1 재료 물성치 및 상관 관계

본 연구에 사용된 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS/CAE(Version6.5)이다. 유한요소해석에서 강관은 쉘 요소(SHELL ELEMENT)인 S4R을 사용하였고, 스테드 볼트는 와이어 요소(WIRE ELEMENT)를 사용하였다. 가력관에 해당하는 상하부의 강관은 강체 요소(RIGID ELEMENT)인 R3D4를 사용하였고, 이 요소들을 조합하여 모델링을 실시하였다. 해석시간의 단축을 위해서 요소망(MESH)은 사각형의 요소망을 사용하였다. 한편 강관과 리브는 사각 요소 형상(QUADRILATERAL ELEMENT SHAPE)을 선택하여 그림 1과 같이 요소망 간격을 조절하였다. 각 재료의 특성은 실험에서 실제로 사용된 인장시험편 시험결과를 사용하여 해석을 실시하였다. 강재는 소성(Plasticity) 옵션을 사용하여 소성거동을 유추하였고, 콘크리트의 붕괴를 추정하기 위해서 손상 소성(Damaged Plasticity) 옵션을 해석에 사용하였다.



(a) 콘크리트 (b) 강관  
그림 1. 유한요소 해석의 콘크리트와 강관의 Mesh

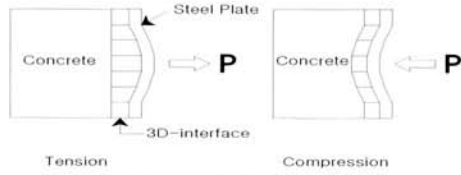


그림 2. 콘크리트와 강판의 접촉

콘크리트와 강판 사이의 접합면 거동은 그림 2에 나타난 것과 같이 강판이 압축력을 받을 때 인장거동이 가능한 강접촉(HARD CONTACT)을 사용하였다. 이 때 강접촉 거동은 그림 3과 같이 접촉하게 되면 법선방향으로 압축력이 전달되는 형태를 갖게 된다. 마스터 서피스(MASTER SURFACE)는 콘크리트를 사용하였고, 강판은 슬레이브 서피스(SLAVE SURFACE)로 하였다.

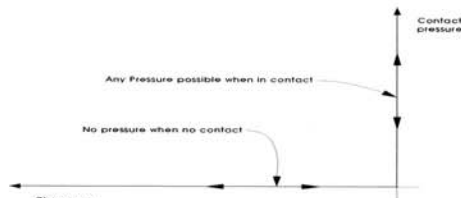


그림 3. 압력 이동 양상

### 3.2 해석방법

해석 순서는 다음과 같다. 먼저 각각의 요소를 모델링하여 재료의 물성치를 입력하였다. 이후 상관관계(Interaction) 및 구속(Constraint)에서 접촉(Contact)을 정리하였다. 그 다음 그림 4와 같이 강판의 상하단에 있는 가력판을 강체판(Rigid Plate)으로 만들어서 콘크리트에 타이 접촉(Tie Contact)을 사용하여 구속하였고, 다점구속(Multiple Point Constraint)을 사용하여 압축력이 균일하게 전달되도록 각각의 절점과 변위제어 지점을 연결하였다. 마지막으로 실험에 앞서 좌굴거동을 파악하기 위해서 좌굴(BUCKLE)해석을 실시하여 좌굴모드를 분석하고 정적-릭스(STATIC-RIKS)해석을 통해 해석 시험체의 압축거동을 살펴보았다.

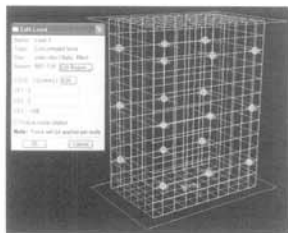


그림 4. 가력판의 구속 및 재하

## 4. 실험 계획

### 4.1 시험체 개요

본 실험은 강판의 좌굴에 영향을 미치는  $B/t$ 를 주요 변수로 하여 42N/mm<sup>2</sup>의 콘크리트 압축강도와 2종류의 강재(SM 490, SS 400)를 사용하였다. 실험에 사용한 강판의 두께는 6mm이고,  $B/t$ 는 25, 33, 50으로 분류하여 사용하였다. 스테르드의 크기는 직경이 8mm이고 그 길이가 71mm가 되도록 계획하였다.

표 1. 시험체 일람표

No.	시험체명	$B/t$	$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	시험체 크기(mm)		
				두께	폭	높이
(1)	CP35/490-T6.0B50	50	42	300	680	900
(2)	CP35/490-T6.0B33	33	42	300	480	600
(3)	CP35/490-T6.0B25	25	42	300	380	450
(4)	CP35/400-T6.0B50	50	42	300	680	900
(5)	CP35/400-T6.0B33	33	42	300	480	600
(6)	CP35/400-T6.0B25	25	42	300	380	450

시험체 형상의 예로,  $B/t$ 가 33인 시험체의 형태를 그림 5에 도시하였다. 표 1은 시험체 일람표를 나타내고 있다. 시험체의 가력은 10,000kN U.T.M.을 사용하여 각 시험체에 1방향으로 단조가력을 실시하였고, 그림 7과 같은 상태가 가력전의 기본 세팅상황이다. 또한 압축에 따른 시험체의 축변위 및 강판의 변형률을 관측하기 위해 그림 6의 (a)와 (b)처럼 LVDT와 스트레인 게이지를 부착하였다.

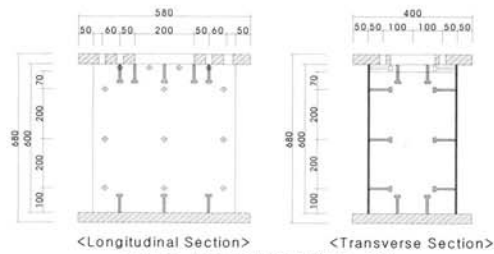
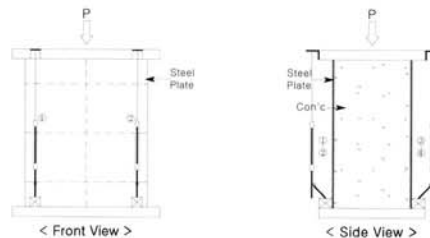
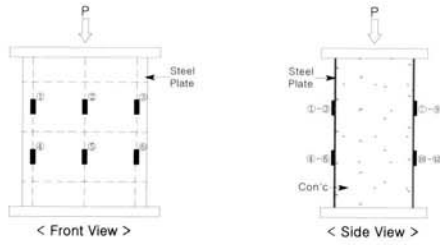


그림 5. 시험체 형상의 예( $B/t=33$ )



(a) LVDT의 설치 위치



(b) 강판용 스트레인 게이지의 설치 위치  
그림 6. 측정 장치 설치 위치



그림 7. U.T.M.과 시험체

## 4.2 재료 물성치

강재의 재료적 특성은 표 2와 같고 콘크리트의 압축강도는 표 3과 같다. 인장 시험편 시험결과 예상 항복강도를 초과하는 강재임을 확인한 후 실험을 실시하였다.

표 2. 강재의 인장강도 시험결과

강종	두께 (mm)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수	항복비율 (%)	연신율 (%)
SM490	6.0	418	572	2.0E5	79	31.4

표 3. 콘크리트의 압축강도 시험결과 및 배합비

압축강도 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	슬럼프 (mm)	단위 골재량 (N/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
42	35.9	250	1422	4158	8191	8966

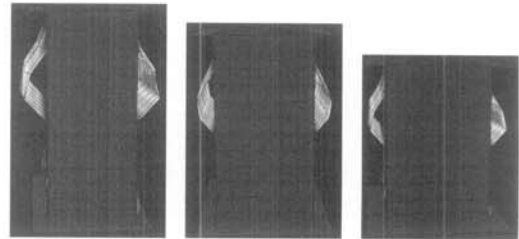
## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 일반적인 좌굴양상

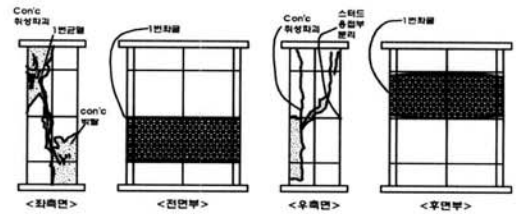
유한요소해석 결과  $B/t$ 에 따른 강판의 1차 좌굴모드 양상은 그림 8과 같다. 그림 8은 CP35/400계열 시험체로 SS 400

강재를 사용한 시험체에 관한 강판의 좌굴양상이다. 또한 SM 490 강재를 사용한 시험체에 관한 강판의 좌굴양상도 동일하게 발생하였다. 그림 9는 실제 SS 400 강재로 제작된 시험체의 실험에서 관측된 강판 좌굴, 콘크리트 파괴 및 스테드 파괴 등의 위치를 도식화 한 것이다. 이와 같이 해석에 의한 강판의 좌굴(그림 8)과 실험에 의한 강판의 좌굴(그림 9)이 동일하게 스테드와 스테드 사이에서 발생하는 것으로 나타났다.

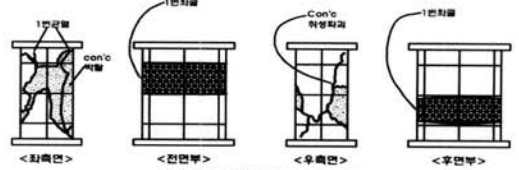
그림 9와 같이 비보강 SC구조(이하 NSC구조)에서 각 시험체별 강판 좌굴시 압축강도와 최대압축강도 등에 관한 내용은 표 4와 같다. 표 4에서  $B/t$ 가 50, 33 및 25일 경우 최대압축강도의 약 39%, 73% 및 80%에서 강판 좌굴이 발생하는 것이 관측되었다. 즉,  $B/t$ 가 클수록 조기에 강판이 좌굴하기 시작하여 최대압축강도 도달할 때 까지 강판이 연성적으로 거동하는 것으로 나타났다.



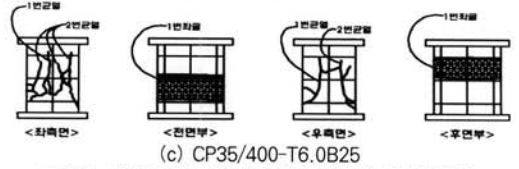
(a)CP35/400-T6.0B50 (b)CP35/400-T6.0B33 (c)CP35/400-T6.0B25  
그림 8. 유한요소 해석에 의한 시험체의 1차 좌굴모드( $B/t=50,33,25$ )



(a) CP35/400-T6.0B50



(b) CP35/400-T6.0B33



(c) CP35/400-T6.0B25

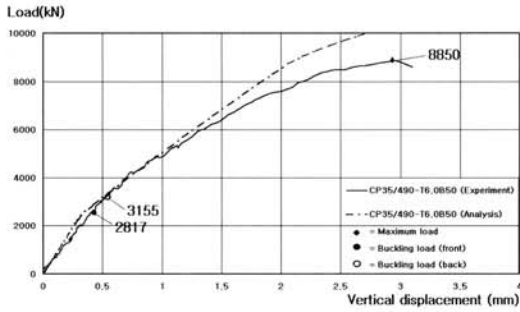
그림 9. 실험에 의한 시험체의 좌굴양상( $B/t=50,33,25$ )

표 4. 강관의 좌굴하중 및 비교 (kN)

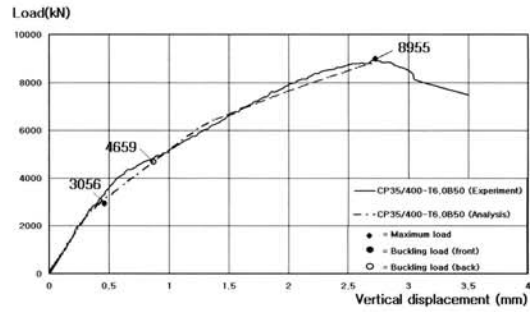
No.	시험체 col(1)	파괴하중 $P_{test}$ col(2)	측정위치 $P_{buckling}$		$P_{test}/P_{buckling}$	
			중앙 col(4)	평균 col(5)	중앙 col(6)	평균 col(7)
(1)	CP35/490-T6.0B50	8850	2986	3031	0.33	0.34
(2)	CP35/490-T6.0B33	8069	5616	5452	0.7	0.68
(3)	CP35/490-T6.0B25	6562	5110	5084	0.78	0.77
(4)	CP35/400-T6.0B50	8956	3850	3850	0.43	0.43
(5)	CP35/400-T6.0B33	7051	5440	5665	0.77	0.77
(6)	CP35/400-T6.0B25	5795	5085	5120	0.81	0.82
(7)	평균치	-	-	-	0.64	0.69
(8)	표준편차	-	-	-	0.20	0.20

5.2 최대압축강도

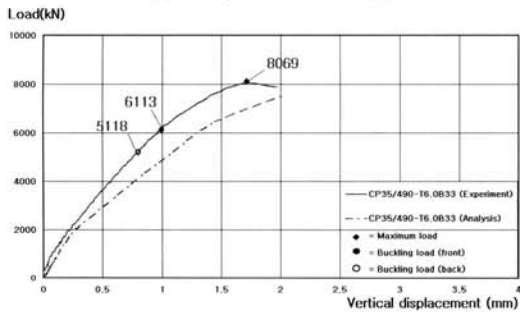
그림 10은 각 시험체별 하중-변위 곡선이다. 이때 실선은 실험에 의한 실험값이고 점선은 유한요소해석에 의한 해석값이다. 우선 실험값을 살펴보면,  $B/t$ 가 50에서 25로 감소할 수록 시험체의 단면도 감소하게 되어 시험체의 최대압축강도 역시 약 9,000kN에서 약 6,300kN으로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 실험값과 해석값을 살펴보면, 시험체 No. 1(CP35/490-T6.0B50)을 제외한 전 시험체 모두 100%에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 유한요소해석을 통한 압축거동 특성과 실제 실험을 통한 압축거동 특성이 유사함을 알 수 있었다.



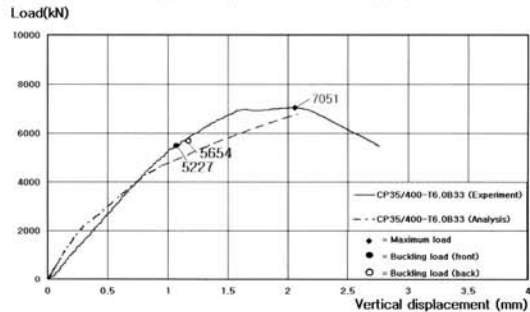
(a) CP35/490-T6.0B50 시험체



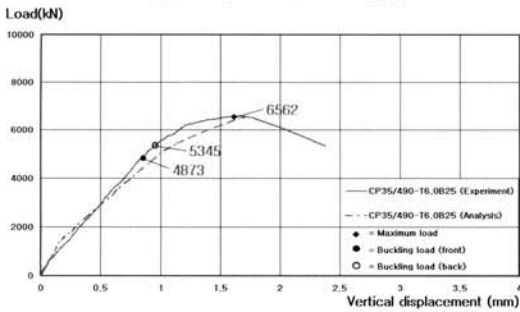
(d) CP35/400-T6.0B50 시험체



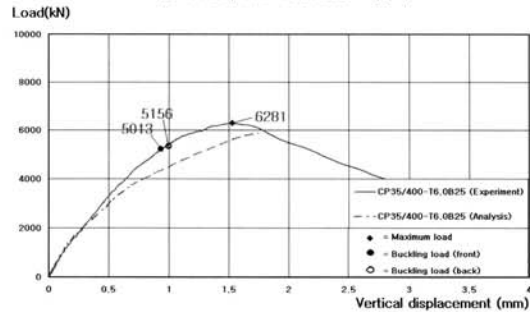
(b) CP35/490-T6.0B33 시험체



(e) CP35/400-T6.0B33 시험체



(c) CP35/490-T6.0B25 시험체



(f) CP35/400-T6.0B25 시험체

그림 10. 각 시험체별 하중-변위 관계

표 5. 시험체별 압축강도의 비교 (kN)

No.	Specimen Description	Test	JEAG4618 Eq(7)	FEM	Proposed Eq(8)	비 고 ( % )			
						col(3) col(4)	col(3) col(5)	col(3) col(6)	col(4) col(5)
col(1)	col(2)	col(3)	col(4)	col(5)	col(6)	col(7)	col(8)	col(9)	col(10)
(1)	CP35/490-T6.0B50	8850	9056	10084	7720	97.7	87.8	114.6	89.8
(2)	CP35/490-T6.0B33	8069	7120	7506	6037	113.3	107.5	133.7	94.9
(3)	CP35/490-T6.0B25	6562	6429	6520	5125	102.1	100.7	128.0	98.6
(4)	CP35/400-T6.0B50	8956	9133	8835	7788	98.1	101.4	115.0	103.4
(5)	CP35/400-T6.0B33	7051	7222	6794	5878	97.6	103.8	120.0	106.3
(6)	CP35/400-T6.0B25	6282	5795	5851	4845	108.4	107.4	129.7	99.0
(7)	평 균 치	-	-	-	-	102.9	101.4	123.5	98.7
(8)	표 준 편 차	-	-	-	-	6.6	7.3	8.1	5.9
(9)	변동계수(%)	-	-	-	-	6.4	7.2	6.5	6.0

압축 구조부재 설계시 가장 중요한 요소는 압축 구조부재의 최대압축강도를 파악하는 일이다. 또한 최대압축강도를 감소시킬 수 있는 재료, 시공 및 기타 요인을 찾아 압축부재 설계시 고려하는 일이다. 그러나 JEAG4618의 식 (7)은 각 재료별 강도에 단면적을 곱하여 추가하는 방식으로 최대압축강도를 예측하는 식으로 압축강도 감소요인을 고려하지 않았다. 따라서 본 제안식은 재료 및 시공에 의한 압축강도 감소요인을 고려하여 콘크리트 압축강도의  $f_{ck}A_c$  대신에  $0.85f_{ck}A_c$ 로 제안하고자 한다. 여기서 0.85는 일반 콘크리트에서 시공 및 편차 등을 고려한 강도저감계수를 나타낸다. 그 제안식은 식 (8)과 같다.

$$P_n = F_{cr}A_s + F_{ys}A_{ss} + 0.85f_{ck}A_c \quad (8)$$

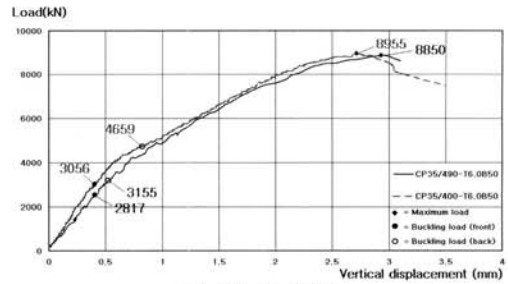
실제 실험결과에 의한 실험값(col(3)), JEAG4618에 의한 기존식(식 (7):col(4)), 유한요소 해석에 의한 해석값(col(5)) 및 제안식(식 (8):col(6))에 관한 시험체 별 압축강도는 표 5와 같다. 표 5에서 확인할 수 있듯이 JEAG4618에 의한 기존식과 실험값을 비교한 결과 실험값/JEAG4618(col(7))의 비는 97%~113%이고 평균치는 103%이고 표준편차는 6.6이다. 따라서 JEAG4618에 의한 최대압축강도 산정이 상당히 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 또한 실험값/해석값(col(8))의 비가 87%~107%이고 평균치는 101%이고 표준편차는 7.3으로 실험과 해석이 상당히 일치하는 것으로 나타났다.

한편 JEAG4618에 의한 기존식값과 유한요소해석에 의한 해석값을 비교하면 JEAG4618/해석값(col(10))의 비가 89%~106%이고 평균치는 98.7%이고 표준편차는 5.9로 실험값/해석값(col(8))보다 평균치는 약간 작지만 표준편차

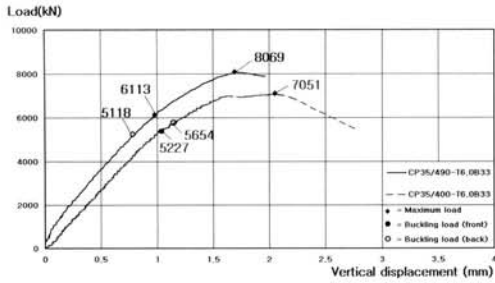
는 상대적으로 더 작게 나왔다. 이것으로 실험값/해석값(col(8))보다 JEAG4618/해석값(col(10))이 더 정확히 일치하는 것으로 나타났다. 이것은 실제 실험에서 재료, 시공 및 기타요인에 의해 압축강도 증대 및 감소가 일어났다는 것을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 압축강도 감소시키는 요인을 고려하여 제안된 식 (8)과 실험값을 비교분석하여 어느 정도의 안전율이 있는지 조사해 보았다. 그 결과 모든 시험체에서 안전율이 14.6%~29.7%로 나타났다.

### 5.3 강판 항복강도의 영향

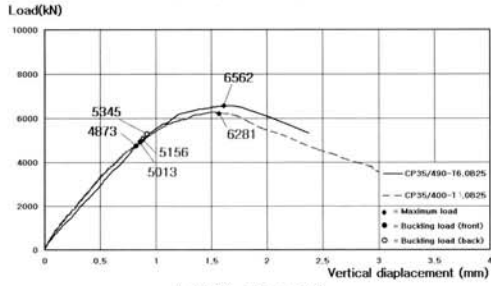
그림 11과 같이 B/t에 따라 강판의 강도가 최대압축강도에 어떤 영향을 미치는지 검토해 보았다. 일반적으로 강판의 강도가 증가하면 시험체의 압축강도도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 탄성거동시험체인 B/t = 50인 시험체에서는 최대 압축강도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 부재가 최대압축강도에 이르기 전에 초기에 탄성좌굴이 발생하여 강판의 강도 증진 효과를 보지 못한 것으로 판단된다.



(a) B/t=50 시험체



(b) B/t=33 시험체



(c) B/t=25 시험체

그림 11. SS4 00과 SM 490의 하중-변위 관계 비교

5.4 이론을 사용한 강판의 좌굴 분석

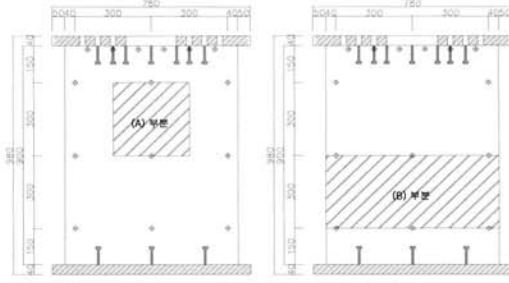
SC구조에서 강판의 좌굴강도를 검토하는데 있어서 판이론을 적용해야 하는지, 혹은 기둥이론을 적용해야 하는지에 대한 연구는 많이 진행되지 않았다. 일본의 기존 논문(Kanchi, 1996; Miyachi, 1996)은 기둥이론을 적용하여 SC구조의 좌굴하중을 검토하였다.

기둥이론을 이용한 좌굴강도와 판의 좌굴이론을 이용한 좌굴강도 공식은 식 (9)와 식 (10)과 같이 각각 표현할 수 있다 (Theodore Galambos, 1998).

$$\sigma_{cr,col} = \frac{\pi^2 E_s}{12K^2(B/t)^2} \quad (9)$$

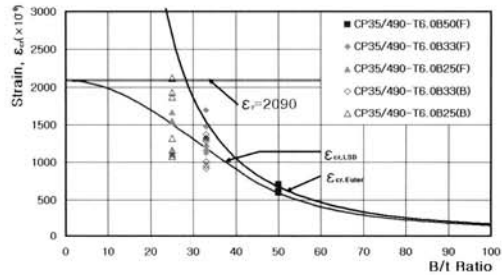
$$\sigma_{cr,pl} = K_{pl} \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu)^2(B/t)^2} \quad (10)$$

그림 12의 (A)부분과 같이 기둥이론에 의한 강판의 좌굴강도는 스퍼드와 스퍼드 사이를 하나의 기둥으로 보고 좌굴강도를 계산하고 이때 유효길이계수는 0.7로 보았다. 또한 그림 12의 (B)부분과 같이 스퍼드열과 스퍼드열 사이를 하나의 판으로 보고 좌굴강도를 계산하였다.

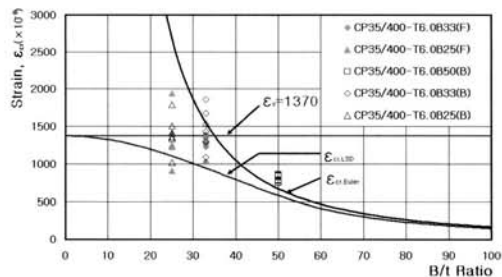


(a) 기둥이론 (b) 판이론  
그림 12. 기둥이론 및 판이론에 의한 유효길이

그림 13은 기둥이론을 이용한 해석이며, 기둥의 좌굴을 설명해 주고 있다. 그림 13의 (a)에서 보여진 바와 같이 SM 490을 사용한 시험체 중 B/t=50인 탄성시험체 만이 AISC에서 제시하는 커브의 범주 내에 속하는 결과를 보여주고 있다. 그리고 탄성 시험체인 B/t가 25와 33의 경우 탄성이론식을 적용함에 약간의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 또한 그림 13의 (b)에서 보여진 바와 같이, SS 400을 사용한 B/t=50인 시험체는 AISC에서 제시한 한계상태곡선보다 높게 분포되고 있으며, 이를 통하여 탄성범위에 가까울수록 오일러 식에 의한 커브를 상회하는 안정적인 범위를 확인하였다. 따라서 B/t=50인 탄성거동 시험체의 경우 유효좌굴길이계수를 역추적 하면 유효좌굴길이계수가 0.7보다 작은 것으로 판단된다.



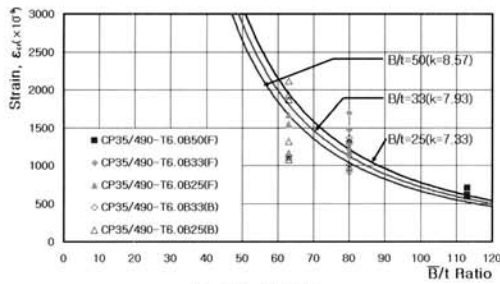
(a) SM 490계열



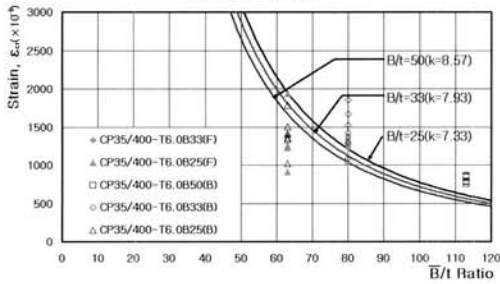
(b) SS 400계열

그림 13. 강판의 변형률 vs B/t비 비교 (기둥이론)





(a) SM 490계열



(b) SS4 00계열

그림 14. 강판의 변형률 vs B/t비 비교 (판이론)

그림 14는 판이론을 이용한 해석이며, 판의 좌굴을 설명해 주고 있다. 그림 14에서 스테어드열과 스테어드열 사이를 하나의 점지지 된 판으로 보고 해석한 경우이며  $B/t=50$ 인 경우만이 안정한 값을 갖는 것으로 보인다. 또한  $B/t=33$ 인 경우 탄성 판 해석 범주 내에 속하는 결과를 보여주고 있다. 그러나  $B/t=25$ 인 경우 일부 탄성 판 해석에 비해 낮은 분포도를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 강판의 좌굴에서 탄성이론의 적용은 탄성거동 시험체에 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

위에서 사용된 유효좌굴길이계수 0.7은 기존 일본의 실험 결과를 토대로 기둥이론에서 얻은 값이다. 따라서 유효좌굴길이계수를 0.7로 하고 강판의 좌굴강도를 산정하는 것이 옳은지 검증할 필요가 있다. 본 연구에서 검증할 대상은 탄성거동을 하는 탄성시험체  $B/t=50$ 으로 선정하였다.

### 5.5 유효좌굴길이계수

기둥이론을 이용하여 강판에 작용하는 압축응력도는 탄성이론을 이용하여 유도해 보았다. 그 상관관계식은 아래의 식을 이용하여 정량적으로 검증해 보았다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2}{12\varepsilon(B/t)^2}} \quad (11)$$

$K$ 값은 기둥이론에 의한 강판좌굴강도의 식 (9)을 이용하여 유도하였다. 이때  $K$ 값은 식 (11)과 같다. 여기서 강판의 변형률은 실험을 통해서 강판에 나타난 변형계이치를 이용하여  $K$ 값을 계산하였다.

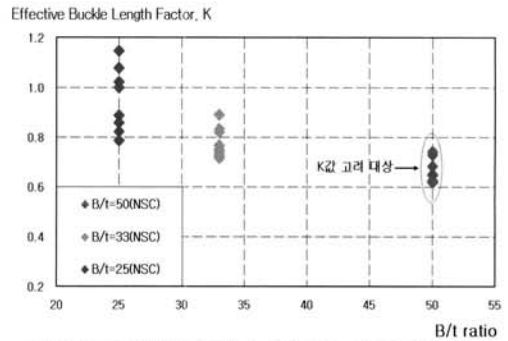


그림 15. NSC 전계열의 B/t 비에 상응하는 K값의 경험적인 값

그림 15는  $B/t$ 에 따른 유효좌굴길이계수를 나타낸다.  $B/t$ 가 33 및 25인 시험체는 비탄성 거동에 가까운 시험체이므로, 오일러 식을 이용한  $K$ 값의 검증에는 탄성시험체인  $B/t=50$ , 즉 시험체 No.(1)과 No.(4)를 이용하여 검증하였다. 이 때  $K$ 값은 최저 0.62에서 0.74에 이르는 분포를 나타냈고, 이 값을 평균한 값은 0.66으로 계산되었다. 그러나 Kanchi(1996)와 Miyauchi(1996)의 실험에서 나타난 것과 같이 일본의 연구진은 강판의 유효좌굴길이 계수를 0.7로 정하였는데 본 연구결과는 일본에서 실시한 유효좌굴길이계수 값보다 우수한 강판 구속효과를 갖는 스테어드 점지지 거동을 하는 것으로 판단된다.

### 5.6 압축력 작용시 스테어드의 인장거동

SC구조에서 일정한  $B/t$ 의 간격으로 스테어드가 강판에 용접되어 있으면 스테어드는 강판에서 전달되는 응력에 저항할 수 있는 거동을 하게 된다. 따라서 강판의 응력이 탄성구간일 경우에는, 스테어드가 전단력을 받는 전단거동을 하고, 강판의 응력이 점차 증가하여 강판이 콘크리트로부터 이격하기 시작하면 스테어드는 인장거동을 하게 된다. 즉, 스테어드와 스테어드 사이의 강판이 밖으로 벌어지면서 스테어드에는 인장력이 작용하게 된다. 이 때 스테어드와 스테어드 사이 강판에 작용하는 좌굴강도와 스테어드 한 개 당 작용하는 인장강도는 식 (12)와 식 (13)과 같다.



$$P_{cr} = \epsilon_{cr} E_{st} B t \quad (12)$$

$$T_{st} = \epsilon_{st} E_{st} A_{st} \quad (13)$$

본 실험에서 강판의 좌굴강도는 강판의 전면과 후면에서 측정된 변형률에 강판의 탄성계수를 곱한 후 강판의 단면적을 곱하는 과정으로 산정하였다. 또한 스테드의 인장강도는 스테드의 몸통 표면에서 측정된 변형률에 스테드의 탄성계수를 곱한 후 스테드의 단면적을 곱하여 산정하였다. 여기서, 스테드와 강판의 탄성계수는 재료시험에서 얻은 값을 사용하였다.

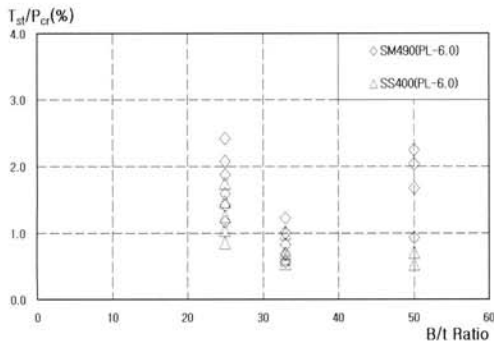


그림 16. B/t 비에 상응하는  $T_{st}/P_{cr}$

그림 16은 B/t에 따른 강판 좌굴강도에 의한 스테드 인장강도 ( $T_{st}/P_{cr}$ )비를 나타내고 있으며, 스테드에 작용하는 축력에 대한 인장력의 비는 약 0.55%~2.4%에 이르는 분포도를 나타냈다. 본 결과에서는 리브로 강판을 보강한 시험체에 대한 분석은 포함하지는 않았지만, 리브로 보강된 강판에서는  $T_{st}/P_{cr}$ 의 비가 약 4%미만까지 분포될 것으로 예측된다. 이는 리브로 보강된 강판의 예비분석을 통해서 얻은 값이다. 현행 강구조의 기준에서는 스테드의 최대인발력은 전체 하중에 대하여 약 3%로 규정하였다. 일본의 연구진에 의한 실험의 결과는 약 0.5%~3.5%의 범위인 것으로 조사되었다. [Miyachi (1996)]. 현재 한국에서 진행되고 있는 SC 구조기술기준(안)에서는 스테드 축지름( $d_s$ )에 상응하는 설계인장강도는 스테드 지배폭당 강판 설계압축강도의 4% 이상이어야 한다고 정하고 있다. 이는 스테드 설계에서 실제로 순수한 강판의 압축보다는 스테드 면에서 강판의 압축과 전단이 조합되어 작용하는 것이 일반적이기 때문이다. 따라서 스테드 인장설계에서 스테드의 인장강도를 강판의 압축강도의 4%로 규정하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 일반적인 비보강 강판콘크리트(NSC)구조의 압축강도 특성을 실험적으로 조사하였다. 그리고 실험결과를 유한요소 해석을 통해서 검증해 보았고, 일반적인 좌굴패턴, 최대 압축력, 강판의 항복강도 증대효과, 유효길이계수, 강판의 좌굴강도분석, 스테드의 설계인장력 등에 대한 분석을 실시하였다. 이와 같은 연구결과에 의해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 비보강 강판콘크리트구조의 압축강도에 대한 좌굴형상은 스테드와 스테드 사이에서 축력과 수직인 횡방향으로 균일한 좌굴이 발생하는 것으로 조사되었다. 이는 유한요소모델을 이용한 Buckling Analysis를 통해 분석한 좌굴패턴과 일치하였다.
- (2) 강판의 국부좌굴한계상태는 강판과 콘크리트의 누가강도를 통해서 계산한 이론값과 실험값이 일치함을 확인하였다. 단, 콘크리트의 압축강도의 85%만을 사용하는 누가강도 제안식을 제안하였다. 이때 실험값은 압축내력이 약 14%에서 29%의 마진이 있는 것으로 확인되어서 누가강도 제안식은 압축강도 측면에서 안전함을 확인하였다.
- (3) 강판의 항복강도가 235 MPa에서 325MPa로 증가하여도 최대내력에 미치는 강판의 내력증가는 미미한 것으로 판단된다. 이는 전체 단면적에 대한 강판의 면적비가 작기 때문일 것으로 판단된다.
- (4) 횡방향으로 일정하게 발생하는 강판의 좌굴형상에 대한 분석에서, 기둥이론과 판의 좌굴이론을 이용하여 분석하여 보았다. 판이론으로 강판의 좌굴을 해석하면, B/t의 비율이 낮은 비탄성 시험체의 경우 제시된 커브보다 낮게 나타났다. 한편 기둥이론을 통한 분석에서는 B/t가 큰 탄성거동 시험체에서는 제시된 AISC와 오일러 커브보다 높게 나타났다. 이는 탄성 시험체의 경우 탄성이론에 의한 오일러 식과 그 거동이 잘 일치하는 것임을 증명하는 것이라 할 수 있다.
- (5) 강판의 유효좌굴길이를 탄성기둥이론을 이용하여 분석해본 결과 좌굴이 일어나는 스테드와 스테드 사이의 지지조건은 고정단에 근접한 값인 0.66으로 나타났다.
- (6) 스테드에 작용하는 설계인장력은 스테드에 작용하는 인장강도와 강판의 좌굴강도를 고려했을 때 약 0.5%에서 2.4%에 이르는 분포로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 전력산업연구개발사업 "원전구조물 모  
 들화 공법(SC구조) 기술개발"의 지원으로 연구가 수행되었고  
 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

대한건축학회(2005), 건설교통부 고시 건축구조설계기준.  
 서정환, 양영성(2001), Data Base에 의한 CFT 기둥의 내력  
 에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회,  
 제13권1호, pp.71-78.  
 유영찬(1997), 콘크리트충진 각형강관 구조의 거동에 관한 연  
 구, 한양대학교 박사학위논문.  
 이승조, 박정민, 김화중(2002), 중심압축을 받는 고강도콘크리트  
 충전각형강관 기둥의 내력특성, 대한건축학회논문집 구조  
 계, 대한건축학회, 제18권7호, pp.11-18.  
 한국강구조학회(2006), 강구조의 설계, 구미서관.  
 한병찬(2001), Nonlinear Response of Concrete-Filled  
 Thin-Walled Steel Box Columns, 충남대학교 박사학  
 위논문.  
 황원섭, 김동조(2002), 콘크리트 구속효과를 고려한 정사각형  
 CFT단주의 강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학  
 회, 제14권6호 pp.813-822.  
 日本電氣協會(2005), 鋼板コンクリート構造耐震設計技術(案)建  
 物・構築物編(JEAG4618).  
 ABAQUS Version 6.5 Documentation, 1996  
 AISC(2005), STEEL CONSTRUCTION MANUAL, 13th  
 Edition, 16.1-77~89.  
 Theodore V. Galambos (1998), Guide to Stability Design  
 Criteria for Metal Structures, Fifth Edition, p. 126  
 Masaki, Kanchi et al.(1996), Experimental Study on A  
 Concrete Filled Steel Structure, Part 2.,  
 Compressive Test (1), Architectural Institute of  
 Japan Conference, pp.1071-1072  
 M.Takeuchi, M.Narikawa, I.Matsuo, K.Hara, S.Uaami  
 (1998), Study on a concrete filled structure for  
 nuclear power plants, Nuclear Engineering and  
 Design 179, pp. 209-223.  
 Yasuyoshi, Miyauchi et al.(1996), Experimental Study  
 on A Concrete Filled Steel Structure, Part 3  
 Compressive Test (2), Architectural Institute of  
 Japan Conference, pp. 1073-1074

부록. 기호

- $A_s$  : 강재 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $A_{st}$  : 전후면 강재 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $A_{sf}$  : 측면 강재 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $A_{ss}$  : 리브보강 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $A_{st}$  : 스티드 축 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $A_r$  : 이형철근 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $A_c$  : 콘크리트 단면적 (mm<sup>2</sup>)
- $B$  : 스티드 간격, (mm)
- $F_y$  : 강재 항복강도, (N/mm<sup>2</sup>)
- $F_{ys}$  : 리브보강 항복강도, (N/mm<sup>2</sup>)
- $F_{yr}$  : 이형철근 항복강도, (N/mm<sup>2</sup>)
- $F_{ym}$  : 합성 항복강도, (N/mm<sup>2</sup>)
- $F_{cr}$  : 강관 좌굴강도, (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_{ck}$  : 콘크리트 설계기준압축강도, (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 강재 탄성계수, (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_{sf}$  : 강판 탄성계수, (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_{st}$  : 스티드 탄성계수, (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_c$  : 콘크리트 탄성계수, (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_m$  : 합성탄성계수, (N/mm<sup>2</sup>)
- $K$  : 스티드로 횡지된 강관의 좌굴길이계수
- $K_{pl}$  : 강판의 좌굴계수
- $kL$  : 유효좌굴길이, (mm)
- $P_n$  : 공칭압축강도, (kN)
- $P_{cr}$  : 스티드와 스티드 사이 강관 좌굴강도, (kN)
- $T_{st}$  : 스티드 인장강도, (kN)
- $r$  : 단면2차반경 ( =  $\sqrt{\frac{I_s}{A_s}}$  )
- $t$  : 강판의 두께, (mm)
- $v$  : 프와송비 ( = 0.3 )
- $\epsilon$  : 강판 스트레인 게이지 측정값
- $\epsilon_{cr}$  : 강관의 좌굴당시 스트레인 게이지 측정값
- $\epsilon_{st}$  : 스티드 몸통 표면 스트레인 게이지 측정값
- $\lambda_c$  : 세장변수

(접수일자 : 2008. 1. 31 / 심사일 2008. 3. 10 /  
 게재확정일 2008. 5. 7)