

무시멘트 콘크리트를 활용한 강판콘크리트 구조의 유효좌굴길이 계수 분석에 관한 연구

한명환, 최병정*
경기대학교 일반대학원 건축공학과

A Study on the Effective Length Factor for Steel Plate-Concrete Structures using Cementless Concrete

Myoung-Hwan Han, Byong-Jeong Choi*

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School

요약 강판 콘크리트구조에 대한 국내 연구는 대체적으로 강도가 큰 원전 구조물에 초점을 맞추고 있다. 현재 안전성과 시공성 측면에서 유리한 SC구조는 특수구조물에만 한정되어 적용되어 왔으며, 최근 구조적으로 장점이 명확한 SC구조에 대해 일반건축물에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 SC 구조를 일반 건축물에 적용하기 위한 기초 연구로서 특히 SC 구조에서 중요한 요소인 콘크리트의 시멘트를 고로슬래그로 대체하여 친환경성에 부합한 구조체를 계획하기 위해 무시멘트 콘크리트를 적용한 SC 구조의 기본 설계 정보를 제시하고자 한다. 이 논문에서는 압축 특성, 중심 압축 하중을 받는 유효좌굴길이계수에 대해 연구하였다. 유효좌굴길이계수를 산정하기 위해서 판 이론을 적용하지 않고 오일러 기둥 이론으로 계산하였다. 유효좌굴길이계수를 계산할 때 필요한 변형률을 측정하여 강판의 항복강도, 강판의 좌굴 및 콘크리트가 파단되는 시점에서의 유효좌굴길이계수를 계산하였다. 또한, 세장비(B/t)를 변수로 최대 압축강도가 국외 및 국내 기준식에 부합하는 지를 검토하였으며 기둥 이론을 적용하여 실험체의 좌굴을 분석하고 측정된 강판의 변형률을 선택하는 방법에 따라 유효좌굴길이계수를 분석하여 기준식에서 제시하는 값과 비교하였다.

Abstract Domestic studies on steel plate concrete structures have focused on nuclear structures with high strength. In this study, the SC structure was applied to the general structure, and the SC structure that is advantageous in terms of safety and construction was limited to a special structure. As a basic study for applying SC, this paper proposes basic design information of a SC structure applying cement concrete to plan the structure, which is suitable for eco-friendly by replacing concrete cement, an important factor in a SC structure, with blast furnace slag. This study examined the compression characteristics and the effective length factor under central compression load. To calculate the effective length factor, the Euler column theory was applied without applying plate theory. The effective length factor was calculated from the yield strength of the steel plate, buckling of the steel plate, and the point at which the concrete was broken. In addition, this study examined whether the maximum compressive strength meets the national and international reference equations with the slenderness ratio (B/t) as a parameter. By analyzing the buckling of the specimen by applying the column theory and selecting the strain of the measured steel plate, the effective length factor was analyzed and compared with the value presented in the reference equation.

Keywords : steel-plate concrete, nuclear structure, non-cement, effective length factor, buckling

1. 서론

강판콘크리트(Steel-plate Concrete, 이하 SC구조 표

기)구조는 강판과 콘크리트 및 전단연결재를 사용한 합성구조시스템으로 콘크리트의 취성파괴 및 강판의 좌굴을 어느 정도 방지가 가능한 안전한 구조로 시공 시 강

본 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(no. 20151520400600).

*Corresponding Author : Byong-Jeong Choi(Kyonggi Univ.)

Tel: +82-31-249-9702 email: bjchoi@kyonggi.ac.kr

Received April 16, 2018

Revised May 3, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

판이 거푸집을 대신할 수 있어 모듈화 공법에서 유리하다[1-4].

이에 안전성과 공기단축에 있어 기대가 큰 원자력 발전소에 SC구조를 적용하기 위해 일본, 미국 등에서 많은 실험이 수행되었으며, 국내는 2009년 SC구조에 대한 실험결과를 토대로 SC구조 기준안(KEPIC-SNG)이 인증되어 원자력 건물에 적용하고 있다[5].

현재 안전성과 시공성 측면에서 유리한 SC구조는 특수구조물에만 한정되어 적용되어 왔으며, 구조적으로 장점이 명확한 SC구조를 일반건축물에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 연구사례로는 SC구조의 콘크리트를 황토콘크리트로 대체하여 적용한 연구로 연구결과 SC구조는 일반구조물에 사용가능함을 입증하였다[6].

콘크리트의 시멘트를 고로슬래그로 대체하여 천연자원 및 에너지 고갈문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염을 동시에 해결 할 수 있을 것으로 판단된다[7].

따라서 본 연구에서는 SC구조를 일반건축물에 적용하기 위한 기초연구로서 SC구조에서 고로슬래그로 대체하여 친환경성에 부합한 구조체를 계획하고, 무시멘트를 사용하여 SC구조의 활용성을 검토하고자 한다. 이를 위해 압축실험체를 계획하고 중심압축하중을 가력하여 구조체의 거동을 확인하였으며, 친환경성에 부합한 구조체로서의 사용 가능성을 파악하였다. 이는 추후 일반건축물 특히 모듈러 건축물에 적용 시 산업부산물의 활용도에 대한 검토를 통해 그 구조적 성능이 입증된다면 친환경성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 친환경 무시멘트 콘크리트를 활용한 SC구조 벽체의 실험결과를 토대로 진행되며, 세장비(B/t)를 변수로 두어 실험체의 최대압축강도가 국외 및 국내기준식에 부합하는 지를 검토하였다. 또한 기둥이론을 적용하여 SC구조에서 구조적으로 중요한 강판의 좌굴을 분석하고 측정된 강판의 변형률 산정 방법에 따른 유효좌굴길이계수(K)를 분석하여 무시멘트를 적용한 SC구조에 대해 적절한 유효좌굴길이계수(K)를 제시하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 무시멘트콘크리트

전 세계적으로 이산화탄소를 줄이려는 노력이 계속되

고 있으며 일본의 경우 통상 산업성 위원회에서 2010년까지 폐기물 및 부산물 사용량을 시멘트 1 톤당 40 % 정도 감소시키겠다고 발표하였다[8]. 유럽의 경우 시멘트 회사들이 2020년까지 시멘트 사용량을 20 % 줄이는 등 시멘트 사용의 감축에 힘쓰고 있다[9]. 시멘트를 대체할 수 있는 주요 재료 중 대표적인 것은 고로슬래그로 이는 고로슬래그 콘크리트로 불리며 일정비율을 시멘트와 섞어서 사용하는 혼화제로 제한적으로 이용되었다[10]. 하지만 현재 시멘트를 사용하지 않은 무시멘트를 기반으로 하여 시멘트를 대체할 수 있는 재료로 고로슬래그는 각광을 받고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 주요 연구사례로는 고로슬래그의 분말도 및 활성화제 종류에 따른 콘크리트의 압축강도의 평가[11], 고로슬래그 결합체의 성능 및 강도발현 특성평가[12] 등이 있으며 주요 연구내용은 재료분야에 대한 연구이다. 본 연구에서는 시멘트를 고로슬래그로 대체하여 합성구조에 적용성을 평가하기 위한 기초연구로서 무시멘트를 기반으로 하는 합성구조체의 구조적 거동을 평가하고자 실험체를 계획하였다.

2.2 SC구조의 설계

SC구조에서 강판의 좌굴은 전체 시험체의 거동에서 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 SC구조에서 강판의 좌굴은 스티드와 스티드 사이에서 일어나기 때문에 스티드의 연직간격(B)와 강판두께(t)의 비로 세장비가 결정된다. 따라서 본 연구에서는 강판의 좌굴에 대한 경계를 탄성영역과 비탄성 영역으로 구분하여 실험체를 계획하였다. Fig. 1과 같이 강판좌굴의 탄성과 비탄성의 경계는 점선과 같으며 B/t가 20 인 실험체는 비탄성영역에서 강판이 좌굴하는 실험체이고 B/t가 30 및 40 인 실험체는 탄성영역에서 좌굴하는 실험체이다. 특히 B/t가 30인 실험체는 탄성과 비탄성의 경계영역에서 좌굴이 발생하는 것으로 영역의 경계는 식 (1)과 식 (2)를 통해 유도하였으며, 유효좌굴길이(K)는 0.7로 가정하였다. 실제로 KEPIC-SNG에서는 유효좌굴길이(K)를 0.5 로 제시하고 있으나, 일본 기준인 JEAG -4618에는 0.7 로 제시하고 있다. 현행 KEPIC-SNG에서 제시하는 K값은 안전측에 있는 것으로 일본기준에 비해 보수적이다. 보편적으로 실험을 통해 제시한 일본의 K값이 이전 SC구조 관련 연구의 실험결과 기둥이론을 적용한 강판좌굴의 경우 유효좌굴길이(K)는 0.7이 비교적 일치하는 것으로 나타났으

므로 이에 따라 K 값을 0.7로 가정하였다[1].

$$\epsilon_{cr} = \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} = \frac{\sigma_y}{E_s} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} E_s &= 205,000 \text{ MPa} \\ K &= 0.7(\text{가정}) \\ B/t &= 600/\sqrt{F_y} \end{aligned} \quad (2)$$

Equation(2)에서의 강재의 항복강도(F_y)는 426 MPa 로 측정되었으므로 좌굴에서 탄성과 비탄성 영역의 경계는 Fig. 1과 같이 B/t가 29 인 지점에서 나타난다.

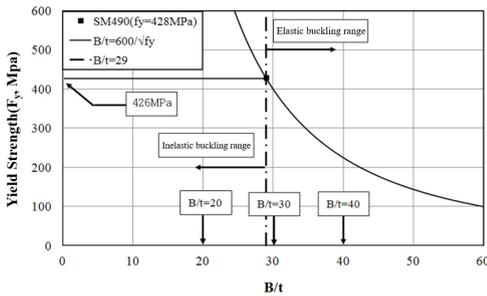


Fig. 1. Elastic and inelastic buckling range

2.3 실험체제원 및 형상

무시멘트 콘크리트를 사용한 SC구조 실험체는 3 개를 계획하였으며 판폭두께비(B/t)에 따라 설계하였다. 실험체의 세부 일람은 Table 1과 같다.

Table 1에서 1번~3번의 실험체는 무시멘트 콘크리트를 활용한 SC구조 실험체이고 4 번~9 번까지 실험체는 시멘트와 황토를 치환하여 계획한 실험체로서 위의 무시멘트 실험체의 유효좌굴길이 계수(K)를 비교하기 위한 실험체이다.

실험체의 형상은 Fig. 2와 같으며 사용된 스테드의 제원은 축직경 13 mm, 길이는 108 mm로 KEPIC-SNG 설계기준에 맞추어 축직경의 8 배 이상으로 무시멘트 실험체와 비교대상 실험체에 동일하게 적용하였다.

Table 1. List of Specimens

No	Specimen	Material	B/t	f_{ck} (MPa)	Specimen Size(mm)		
					Thickness	Width	Height
1	NC12/490-T6B20	No Cement	20	12	250	280	380
2	NC12/490-T6B30		30			370	500
3	NC12/490-T6B40		40			460	620
4	C24/490-T6B20	Cement	20	24	250	280	380
5	C24/490-T6B30		30			370	500
6	C24/490-T6B40		40			460	620
7	H16/490-T6B20	Cement+Hwangtho	20	16	250	280	380
8	H16/490-T6B30		30			370	500
9	H16/490-T6B40		40			460	620

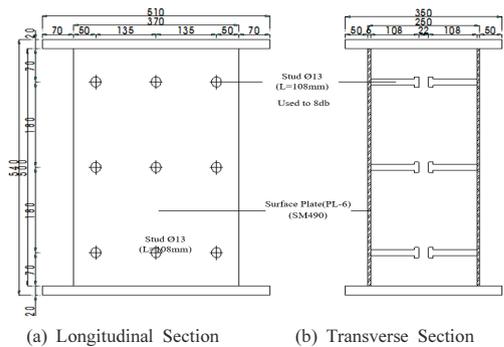


Fig. 2. Specimens Detail

2.4 가력 및 측정방법

실험체의 가력은 5,000 kN U.T.M.을 사용하여 Fig. 3과 같이 중심축하중으로 단조가력을 실시하였다. 실험체에 편심을 최소화하기 위하여 본실험이 실시되기 전에 예상최대압축강도의 10 %정도 이하로 탄성범위 내에서 예비가력을 하여 변위가 일정하도록 하였다. 예비가력은 Fig. 4(a)와 같이 설치된 4 개의 LVDT가 거의 동일한 변위로 측정될 때 본가력을 실시하였다.



Fig. 3. U.T.M. and Specimen(Specimen no. 4)

연직방향으로 작용하는 압축하중에 의한 구조적 거동을 관찰하기 위해 LVDT를 모서리 네 방향의 Fig. 4(a)와 같이 설치하였다. Fig. 4(b)처럼 스티드와 스티드 사이에 강재용 스트레인게이지를 설치하여 강관의 변형률을 측정하였으며 스티드의 인장거동을 확인하기 위하여 스티드의 위·아래 방향에 강재용 스트레인게이지를 설치하였다.

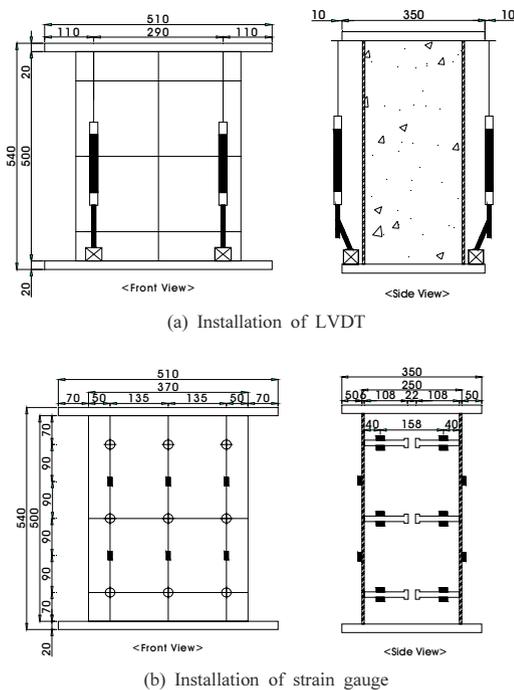


Fig. 4. Measurement of displacement and strain

3. 재료시험

3.1 콘크리트의 종류별 압축강도 시험

본 실험에 콘크리트 배합설계강도 18 MPa에 대한 설계배합표는 Table 2와 같다. 무시멘트의 압축강도 실험결과 12 MPa로 당초 계획했던 압축강도보다 낮게 측정되었다. 이는 무시멘트로 사용한 고로슬래그시멘트의 성능은 모재의 화학적 조성, 알칼리 활성화제의 종류, 첨가량, 양생온도와 시간 및 물·결합재 등에 의해서 다소 변동적인 것으로 나타나 이에 대한 영향으로 판단된다 [6]. 따라서 무시멘트콘크리트의 최대압축강도는 12 MPa를 적용하여 설계식을 계산하였으며 실험결과 비교하였다.

Table 2. Results of compressive strength for cylinder

Specimen	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)	W/C (%)	Unit Volume Weight(N/m ³)			
				W	C	H	S
OPC	24	120	50	1813	3626	0	7428
Hwangtoh	16	90	50	1813	2900	725	7134
Specimen	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)	Unit Volume Weight(kgf/mm ³)				
			GGBS	W	S	G	
Cementless	12	110	101	45	176	233	11.05

3.2 강재의 인장강도시험

본 실험에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0801의 규정에 준하여 시험편 5호를 제작하였다. KS B 0802의 금속인장시험방법에 따라 인장강도시험을 실시하였다. 시험편은 두께가 6.0 mm인 SM490 강재이다. 변형률은 각 시험편에 부착된 스트레인게이지를 통하여 측정하였으며 강재의 시험결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Results of tensile coupon test

Steel plate	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Ratio (%)	Ductility (%)
SM490	6.0	426	534	2.02E5	80	36

4. 최대압축강도 및 파괴양상

4.1 콘크리트의 종류별 압축강도 시험

실험결과는 국내기준식인 KEPIC-SNG에서 규정하고 있는 Equation(3)과 국외기준식인 일본의 JEAG-4618에서 제시하고 있는 Equation(4)와 비교하였다.

$$P_{KEPIC-SNG} = 2 A_p F_{cr} + 0.85 A_c f_{ck} \quad (3)$$

$$P_{JEAG} = F_{cr} A_s + f_{ck} A_c \quad (4)$$

실험결과 최대압축강도는 Table 2와 같이 무시멘트 실험체의 경우 B/t가 증가함에 따라 1,878 kN에서 2,146 kN으로 증가하였다. 기준식의 비교에서 KEPIC-SNG와 비교했을 때 평균 98 %로 나타났으며 보수적인 기준으로 JEAG-4618에 대해서는 실험값이 설계 값에 약 92 %의 범위를 보여주었다.

또한 Fig. 5와 같이 무시멘트 실험체의 하중-변위 곡선에서 B/t가 증가할수록 실험체의 거동이 취성적으로 나타났다.

Fig. 6과 같이 실험값과 KEPIC-SNG 기준식을 비교한 결과 OPC 및 황토콘크리트 실험체의 실험값이 대부분 KEPIC-SNG 기준식에 상회하는 결과를 보여주고 있지만 무시멘트 실험체의 경우 실험값이 기준식 대비 약 98 %로 비슷한 결과를 보여주었다. 이는 콘크리트의 강도가 SC구조의 성능에 많은 영향이 있으며 강판의 역할 보다는 콘크리트의 역할이 중요하다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Comparison of Compressive strength (kN)

no. (A)	Specimen (B)	Test Value (C)	PKSNG (KEPIC-SNG) (D)	PJEAG (JEAG-4618) (E)	Ratio (%)	
					C/D	C/E
1	NC12/490-T6B20	1878	1900	2010	98	93
2	NC12/490-T6B30	2013	2102	2247	96	90
3	NC12/490-T6B40	2146	2106	2286	101	93
no. 1~no. 3 average		-	-	-	98	92
Standard deviation		-	-	-	11.7	7.1
4	C24/490-T6B20	3052	-	3037	116	100
5	C24/490-T6B30	3528	3079	3811	115	92
6	C24/490-T6B40	4164	3320	3814	125	109
no. 4~no. 6 average		-	-	-	119	100
Standard deviation		-	-	-	5.5	8.5
7	H16/490-T6B20	2539	2186	2504	116	101
8	H16/490-T6B30	3055	2480	3106	123	98
9	H16/490-T6B40	3812	2575	2938	148	130
no. 7~no. 9 average		-	-	-	129	105
Standard deviation		-	-	-	16.8	17.7

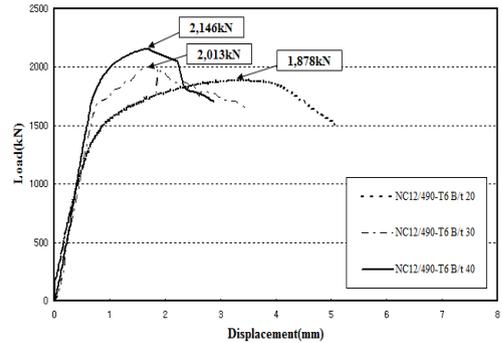


Fig. 5. Load-displacement curve of cementless specimen

Fig. 7은 실험값과 보수적인 설계식인 JEAG -4618 기준식을 비교한 것으로 대부분 B/t 20 인 실험체의 경우 비슷한 결과를 보여주고 있지만, 탄성영역으로 갈수록 기준식에 부합하지 못하는 결과를 보여주고 있으나 콘크리트의 강도가 낮을수록 실험값과 일치되는 경향을 보여주었다.

무시멘트 실험체의 좌굴양상 및 파괴형태는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 (a)와 (c)에 나타난 빗금은 강판부분 좌굴로 인한 파괴양상 및 파괴형태를 나타내고, (b)와 (d)의 경우 콘크리트가 파괴되며 발생하는 균열의 모습이다. 일반적인 SC구조의 파괴양상은 최초 콘크리트의 미세한 균열과 함께 콘크리트 사이의 강판이 이격하기 시작하면서 강판이 좌굴되어 최대하중에 도달하였다. 황토 콘크리트 및 OPC 실험체의 경우도 마찬가지로 좌굴양상 및 파괴형태는 비슷한 것으로 나타났다.

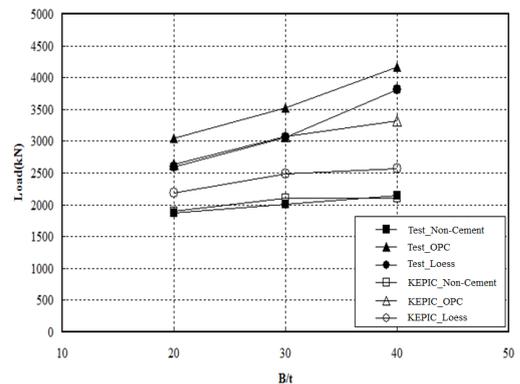


Fig. 6. Comparison of Maximum Compressive Strength (Experimental value vs KEPIC-SNG)

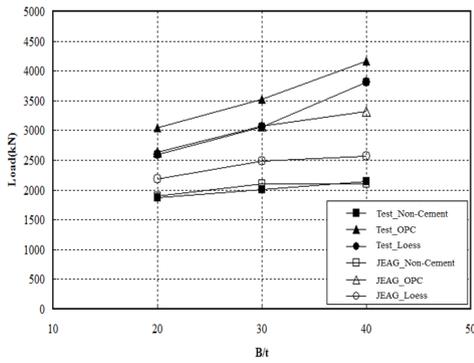


Fig. 7. Comparison of Maximum Compressive Strength (Experimental value vs JEAG-4618)

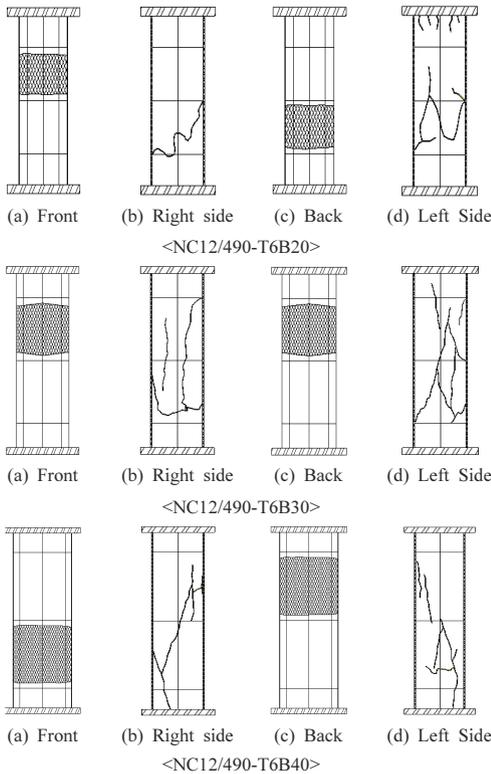


Fig. 8. Destructive aspect of specimens

5. 유효좌굴길이계수(K) 분석

5.1 유효좌굴길이계수(K) 분석방법

SC구조에서 강관의 좌굴은 스테드와 스테드 사이 강관에서 일어나며 합성된 콘크리트의 구속효과가 강관의

좌굴에 영향을 미친다. 따라서 SC구조에서 강관의 좌굴을 정확하게 분석하기 위해서는 강관과 콘크리트의 거동 특징에 따라 정확하게 분석하여 K값을 예측해야 한다. 좌굴 분석을 위해 적용할 수 있는 이론은 대표적으로 기둥이론과 판이론이다. 그 중 기둥이론이 일반적으로 판이론보다 SC구조에 적합한 양상을 이진 연구결과를 통해 확인하였으므로[2] 본 연구에서는 기둥이론을 적용하여 유효좌굴길이계수를 분석하였다.

강관의 좌굴강도를 검토하는데 있어 기둥의 좌굴이론을 적용한 공식은 오일러 좌굴 이론에 근거한 공식으로 오일러 좌굴식은 Equation(5)와 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(Kl)^2} \quad (5)$$

오일러 좌굴식을 이용하여 기둥좌굴이론을 적용한 공식을 유도할 수 있는데 이를 유도한 것은 Equation(6)과 같다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12K^2(B/t)^2} \quad (6)$$

이를 변형률로 치환하여 식을 정리하면 Equation (7)과 같다.

$$\epsilon_{cr} = \frac{\pi^2}{12K^2(B/t)^2} \quad (7)$$

유효좌굴길이계수(K)는 기둥이론에 의한 강관좌굴강도의 Equation(7)을 이용하여 유도하였다. 이때 K값은 Equation(8)과 같다. 여기서, 강관의 변형률(ϵ)은 실험을 통하여 측정된 값을 사용하였다.

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2}{12\epsilon(B/t)^2}} \quad (8)$$

여기에서 유효좌굴길이(K)값을 계산하는데 있어 강관의 변형률(ϵ)을 선택하는 중요한 요소이며 연구자의 관점에 따라 선택되는 값이 다르기 때문에 측정된 변형률에서 정확한 좌굴 변형률을 선택하는 것이 관건이다. 본 실험에서 강관에 부착한 스트레인 게이지 측정값의 그래프

형상은 다음의 Fig. 9 및 Fig. 10으로 설명될 수 있으며 비탄성영역과 탄성영역을 구분하여 도시하였다. 비탄성 실험체의 경우 일반적으로 강판의 변형률 양상은 1 개, 탄성 실험체의 경우 3 개의 양상을 확인하였다. 이를 설명하면, Fig. 9는 비탄성 실험체의 강판에 부착된 게이지 측정 양상을 도시한 것으로 비탄성 실험체의 스트레인 게이지 측정값을 분석한 결과 대부분의 형상은 Fig. 9를 따르고 있으며 이를 통해 3 개의 값을 구분하여 변형률을 선택하였다.

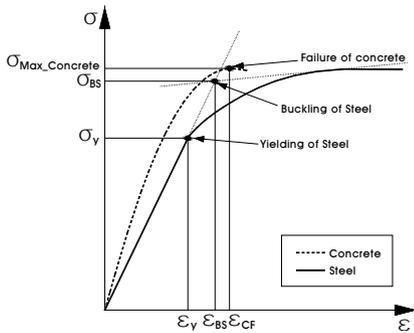


Fig. 9. Selection method of steel plate strain of inelastic specimen

Fig. 9에서 항복변형률(ϵ_y)은 강판의 인장강도(F_y)가 426 MPa에 도달했을 때의 변형률이고 강판이 좌굴될 때의 변형률(ϵ_{BS})은 강판의 최대응력에서 접선(이하 접선법)을 도시하여 항복변형률(ϵ_y)을 지나는 지점과 만나는 곳이다. 이의 방법은 현재 일반적으로 사용하고 있는 방법으로 일반적으로 강판의 좌굴응력(F_{cr})으로 선택되는 지점이다. 또한 비탄성 실험체의 경우 콘크리트의 응력이 최대로 도달(콘크리트의 파단)했을 때의 변형률(ϵ_{CF})까지 강판이 응력을 분담하고 있으므로 이때의 변형률도 측정하여 비교하였다.

Fig. 10-(a)는 강판의 변형률은 탄성구간에서 강판이 항복(F_y)까지는 탄성적으로 거동하다가 이후 변형률이 반대방향으로 진행된 경우이다. 여기에서의 강판의 좌굴 양상은 그래프에서 쉽게 선택할 수 있으며, 이때 좌굴이 시작된 지점(ϵ_{BS})에서의 응력이 강판의 좌굴응력(F_{cr})으로 선택된다. 또한 강판이 좌굴이 시작되어 콘크리트가 최대응력으로 도달할 때의 변형률(ϵ_{CF})을 강판의 좌굴로 인한 파단으로 보고 이때의 변형률을 측정하였다.

Fig. 10-(b)는 Fig. 10-(a)와 비슷한 양상이지만 강판이 항복변형률(ϵ_y)에 도달하지 못하고 강판이 좌굴한 것을 나타낸 것이다.

Fig. 10-(c)의 형상은 탄성실험체에서 주로 나타나는 양상으로 Fig. 10-(a) 그래프와 다른 점은 실험체가 취성적인 거동을 보인다는 점이다. Fig. 10-(c)에서 강판의 항복변형률(ϵ_y), 강판의 좌굴이 시작되는 지점의 변형률(ϵ_{BS}), 강판의 좌굴이 진행되어 파단되는 변형률(ϵ_{CF})을 측정하였다. 위의 4가지 case에 비추어 그래프에서의 변형률 값을 선택하고 이를 통해 각 실험체의 유효좌굴길이 계수를 계산하여 정리하였다.

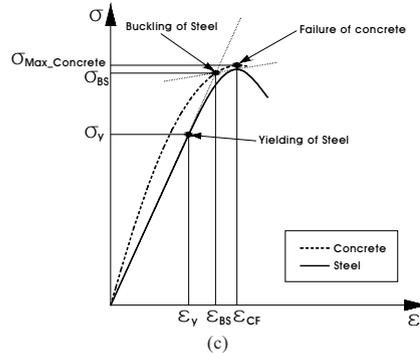
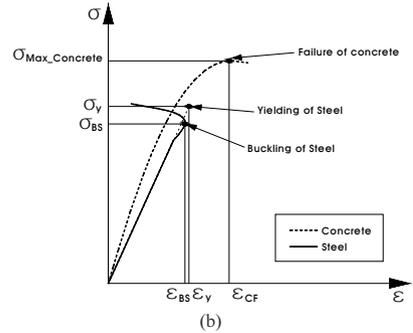
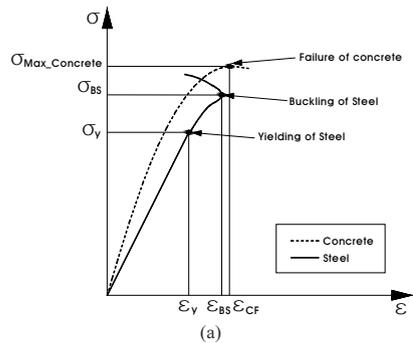


Fig. 10. Selection method of steel plate strain of elastic specimen

5.2 유효좌굴길이계수(K) 분석결과

유효좌굴길이계수를 분석하기 위해 실험체의 적용된 강판의 B/t의 따라 분석을 진행하였다. Table 5에 나타낸 바와 같이 B/t가 20 인 실험체의 경우 항복변형률(ϵ_y)을 이용하여 산정한 K값은 0.99 이고 강판의 좌굴이 시작되는 지점의 변형률(ϵ_{BS})을 사용하여 계산한 K값은 1.00~1.40 의 범위를 보여주고 있으며 평균 1.13 표준편차 0.09로 나타났다. 여기에서 강판의 변형률이 다소 작게 측정되어 항복변형률(ϵ_y)로 산정한 값보다 유효좌굴길이계수(K)값이 다소 크게 나타났다. 콘크리트가 파단이 되는 시점의 변형률(ϵ_{CF})로 계산된 K값은 0.82 로 나타났으며 KEPIC-SNG 기준식인 Equation(9)로 산정한 좌굴응력을 사용하여 계산한 K값은 1.05 로 나타났다.

$$F_{cr} = (1.5 - 0.043 \frac{K_p B}{t_p} - 90 \epsilon_n) F_{yp} < F_{yp} \quad (9)$$

Table 6에 나타낸 바와 같이 B/t가 30 인 실험체의 경우 항복변형률(ϵ_y)을 이용하여 산정한 K값은 0.66 이고 강판의 좌굴이 시작되는 지점의 변형률(ϵ_{BS})을 사용하여 계산한 K값은 0.67~0.87 의 범위를 보여주고 있으며 평균 0.80 표준편차 0.06 으로 나타났다. 강판의 좌굴이 진행되어 파단이 되는 변형률(ϵ_{BF})로 계산된 K값은 0.65 로 나타났으며 이는 항복변형률(ϵ_y)로 산정한 K값과 비슷한 결과를 보여주고 있다. Equation(9)로 산정한 좌굴응력을 사용하여 계산한 K값은 0.81 로 나타났다.

Table 5. Effective buckling length factor(K) in accordance with the strain (In specimens of B/t 20)

Steel Plate Gage	NC-B/t 20																
	strain	ϵ_y	ϵ_{BS}	ϵ_{CF}	ϵ_{KEPIC}	K_{ϵ_y}	$K_{\epsilon_{BS}}$	$K_{\epsilon_{CF}}$	$K_{\epsilon_{KEPIC}}$								
FS1	0.00207	0.001708	0.0030	0.0018	0.99	0.82	1.05										
FS2		0.00204															
FS3		0.001567															
FS4		0.001642															
FS5		0.001672															
FS6		0.00105															
BS1		0.001713															
BS2		0.001609															
BS3		0.001527															
BS4		0.001619															
BS5		0.001712															
BS6		0.001703															
Ave.																	
S.Dev																	

Table 6. Effective buckling length factor(K) in accordance with the strain (In specimens of B/t 30)

Steel Plate Gage	NC-B/t 30																
	strain	ϵ_y	ϵ_{BS}	ϵ_{BF}	ϵ_{KEPIC}	K_{ϵ_y}	$K_{\epsilon_{BS}}$	$K_{\epsilon_{BF}}$	$K_{\epsilon_{KEPIC}}$								
FS1	0.002078	0.001207	0.00216	0.001404	0.66	0.66	0.65	0.81									
FS2		0.001739															
FS3		0.001231															
FS4		0.001338															
FS5		0.001346															
FS6		0.001373															
BS1		0.001494															
BS2		0.00206															
BS3		0.001601															
BS4		0.001264															
BS5		0.001316															
BS6		0.001505															
Ave.																	
S.Dev																	

Table 7에 나타낸 바와 같이 B/t가 40인 실험체의 경우 항복변형률(ϵ_y)을 이용하여 산정한 K값은 0.50이고 강판의 좌굴이 시작되는 지점의 변형률(ϵ_{BS})을 사용하여 계산한 K값은 0.63~1.03 의 범위를 보여주고 있으며 평균 0.76 표준편차 0.11 으로 나타났다. 강판의 좌굴이 진행되어 파단되는 변형률(ϵ_{BF})로 계산된 K값은 0.46 로 나타났으며 항복변형률(ϵ_y)로 산정한 K값과 대체적으로 비슷한 결과를 보여주고 있다. KEPIC-SNG Equation(9)로 산정한 좌굴응력을 사용하여 계산한 K값은 0.73 으로 나타났다.

Table 7. Effective buckling length factor(K) in accordance with the strain (In specimens of B/t 40)

Steel Plate Gage	NC-B/t 40																
	strain	ϵ_y	ϵ_{BS}	ϵ_{BF}	ϵ_{KEPIC}	K_{ϵ_y}	$K_{\epsilon_{BS}}$	$K_{\epsilon_{BF}}$	$K_{\epsilon_{KEPIC}}$								
FS1	0.002078	0.001072	0.00244	0.000956	0.50	0.50	0.46	0.73									
FS2		0.001286															
FS3		0.001162															
FS4		0.001029															
FS5		0.00105															
FS6		0.001014															
BS1		0.000641															
BS2		0.000812															
BS3		0.000481															
BS4		0.000983															
BS5		0.000891															
BS6		0.000844															
Ave.																	
S.Dev																	

위의 K값을 정리하여 Table 8 및 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 비탄성 영역에 비해 탄성좌굴영역에 해당되는 실험체의 경우 항복변형률(ϵ_y)로 산정한 K값이 콘크리트가 최대응력에 도달할 때의 변형률(ϵ_{CF})로 계산된 K값과 비슷한 결과를 보여주고 있으며 강판에서 측정된 변형률로 산정한 유효좌굴길이 계수(K)값이 KEPIC-SNG에서 제시하는 Equation(9)를 이용하여 계산한 값과 비슷하였다.

Table 8. Effective buckling length factor(K)

B/t	$K_{\epsilon_{BS}}$ (a)	K_{ϵ_y} (b)	$K_{\epsilon_{CF}}$ (c)	K_{KEPIC} (d)	(b)/(a)	(c)/(a)	(d)/(a)
20	0.97	0.99	0.82 ($K_{\epsilon_{CF}}$)	1.05	1.02	0.84	1.08
30	0.80	0.66	0.65	0.81	0.83	0.81	1.01
40	0.76	0.50	0.46	0.73	0.66	0.61	0.96

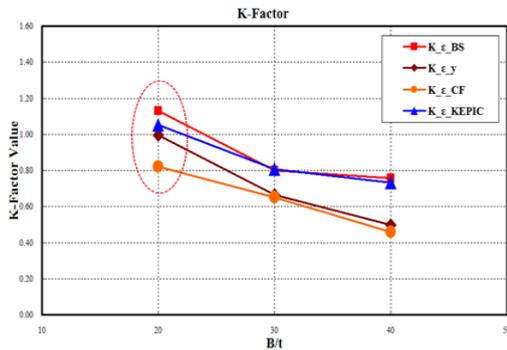


Fig. 11. Effective buckling length factor(K)

비탄성 실험체의 경우 판의 변형률이 다소 작게 측정되어 항복변형률(ϵ_y)로 산정한 값보다 유효좌굴길이계수(K)값이 다소 크게 나타났다. 따라서 비탄성 실험체의 강판 변형률을 선택할 때 다음의 방법으로 변형률을 선택하고 유효좌굴길이 계수(K)값을 계산하였다.

Fig. 12의 방법으로 좌굴되는 지점을 선택할 수 있는데 이를 설명하면 초기 곡선에서의 접선과 그래프의 최대 하중점, 면적이 같아지는 지점을 지나는 선의 교점을 강판의 좌굴이 시작되는 지점의 변형률(ϵ_{BS})로 간주하는 방법이다(이하 면적법). 이와 같은 방법으로 좌굴길이 변형률을 선택하여 K값을 계산하면 Table 8 및 Fig. 13과 같은 결과를 보여준다.

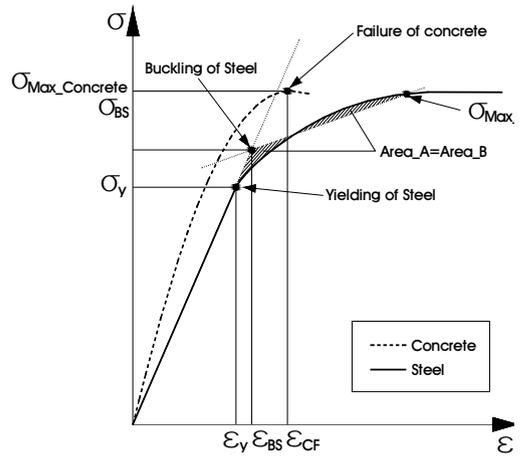


Fig. 12. Selection method of steel plate strain of inelastic specimen according to area

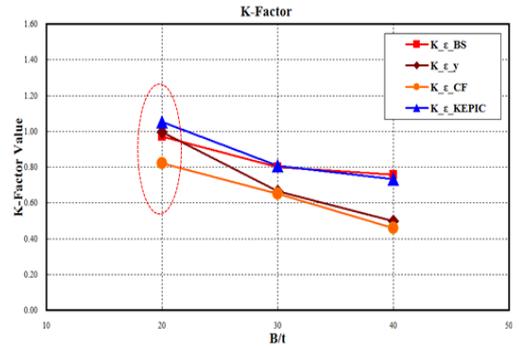


Fig. 13. Effective buckling length factor(K) (By way of Selection method of steel plate strain of inelastic specimen according to area (Fig. 12))

Table 8에서 비탄성실험체(B/t 20)의 항복변형률(ϵ_y)로 산정한 유효좌굴길이 계수(K)가 Fig. 13과 같이 선택된 강판의 변형률로 계산된 값보다 작은 것을 알 수 있다. 따라서 비탄성 실험체의 강판의 변형률을 선택할 때 Fig. 12의 방법이 용이한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 중심압축하중을 받는 무시멘트 콘크리트를 활용한 SC구조 벽체를 계획하고 세장비(B/t)를 변수로 최대압축강도가 국외 및 국내기준식에 부합하는지를 검토하였다. SC구조 벽체에 기동이론을 적용하여 실

험체의 좌굴을 분석하고, 측정된 강판의 변형률을 선택하는 방법에 따라 유효좌굴길이계수(K)를 분석하여 기준식에서 제시하는 값과 비교하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험결과 최대압축강도는 무시멘트실험체의 경우 B/t가 증가함에 따라 1,878 kN에서 2,146 kN으로 증가하였다. 기준식의 비교에서 KEPIC-SNG와 비교했을 때 평균 98 %로 나타났으며 보수적인 기준으로 JEAG-4618에 대해서는 실험값이 설계값에 약 92 %의 범위를 보여주었다.
2. 비탄성 영역에서 유효좌굴길이 산정 시 강판의 변형률을 선택할 때 접선법과 면적법을 활용하여 유효좌굴길이 계수(K)값을 분석한 결과 비탄성 영역에서는 면적법이 KEPIC-SNG 및 JEAG-4618과 비슷하였다. 따라서 비탄성 영역에서는 강판의 변형률을 선택할 때 접선법 보다는 면적법이 용이한 것으로 판단된다.
3. 탄성 영역에서는 강판이 탄성좌굴 후 급격하게 콘크리트가 파단되는 파괴양상을 보여주었으며 특히 3 가지 방법에 의해 강판 변형률(ϵ_{BS})을 선택하여 유효좌굴길이를 계산한 결과 KEPIC-SNG 기준식과 일치하였다.
4. 비탄성 영역의 경우 좌굴길이 계수를 강재의 항복강도를 이용하여 보수적으로 적용하고 있으며 KEPIC-SNG의 좌굴강도식을 이용하여 산정한 변형률(ϵ_{KEPIC}), 강재의 항복강도로 산정한 변형률(ϵ_y), 면적법을 이용하여 선택한 변형률(ϵ_{BS})은 대체적으로 유효좌굴길이 계수(K)값이 비슷한 경향을 보여주었다. 이는 콘크리트가 최대응력에 도달할 때의 변형률(ϵ_{CF})로 산정한 값보다 높은 값을 보여주고 있으므로 유효좌굴길이 계수(K)에 대한 보수적인 적용을 완화할 필요가 있다.

References

[1] Cheol-Kyu Kang, Byong-Jeong Choi, Beack-Seon Jeoung, Compressive Behavior of Steel Plate-Concrete Structures using Eco-Oriented Cement Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, vol. 24, no. 5, pp. 583-593, October, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2012.24.5.583>

[2] Byong-Jeong Choi, Hong-Soo Han, Analytical Studies on the Steel Plate-Concrete Structures under Compressive Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, vol. 20, no. 2, pp. 269-278, April, 2008.

[3] Byong-Jeong Choi, Hong-Soo Han, Won-Ki Kim, Seung-Joon Lee, Woo-Bum Kim, Compression Tests for Stiffened Steel Plate-Concrete Structures with Variation of B/t Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, vol. 20, no. 4, pp. 549-559, August, 2008.

[4] Hong-Soo Han, Byong-Jeong Choi, Kweon-Gyu Han, Compression Behavior of Steel Plate-Concrete Structures with the Width-to-Thickness Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, vol. 23, no. 2, pp. 549-559, April, 2011.

[5] KEA, Korea Electric Power Industry Code-SNG Steel Plate-Concrete Structures(KEPIC-SNG), Korea Electric Association, 2010.

[6] Architectural Institute of Japan, Seismic Design guideline for Double Steel Skin Wall Systems JEAG 4618, Architectural Institute of Japan, 2005

[7] Kwang-Myong Lee, Jung-In Seo, Evaluation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Alkali Activated Slag Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 27, no. 3, pp. 307-313, June, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.3.311>

[8] British Standards Institution, Design of composite steel and concrete structures, Eurocode 4, Part 1.1, 2004.

[9] Chorus, "An introduction to the core fast system", Bi-steel Manual, 2004.

[10] M Kanchi, T Kitano, R Sugawara, K Hirakawa, Experimental study on a concrete filled steel structures, Part2, Compressive test, Architectural Ins. Japan. Conf. 1996.

[11] J. Y. Richard Liew, K. M. A. Sohel, Light weight steel-concrete-sandwich system with J-hook connectors, *Engineering Structures*, vol. 31, no. 5, pp. 1166-1178, May, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.01.013>

[12] Liang, Q. Q, Uy, B, Richard Liew, J. Y, Nonlinear analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns with local buckling effects, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 6, pp. 581-591, June, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.09.007>

한 명 환(Myoung-Hwan Han)

[정회원]



- 1984년 4월 ~ 2012년 12월 : 국방부, 합동참모본부, 공군본부, 공군 작전사령부, 공군비행단 (2012년 12월, 공군대령 전역)
- 2007년 3월 ~ 2009년 8월 : 연세대학교, 공학대학원, 방재안전학과 (석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : ㈜정립건축 종합건축사사무소, CM사업본부 (전무이사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 경기대학교, 일반대학원, 건축공학과 (박사과정)

<관심분야>

건축, 건축시공

최 병 정(Byong-Jeong Choi)

[정회원]



- 1999년 1월 ~ 1999년 3월 : (미)BSW ARCHITECT (Enginnering Specialist)
- 1999년 4월 ~ 2000년 12월 : (미)HARZA ENGINEERING COMPANY (구조설계부)
- 2001년 3월 ~ 2017년 3월 : 경기대학교(정교수)
- 2016년 10월 ~ 현재 : 경기대학교 공학대학원(공학대학원장)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 창의공과대학(이공대학장)

<관심분야>

건축, 토목