

축방향 압축을 받는 다각형 단면 쉘 기둥구조의 국부좌굴강도에 관한 해석적 연구

박성미¹, 최병호^{1*}

¹한밭대학교 토목환경도시공학부 토목공학과

Finite Element Analyses on Local Buckling Strength of Polygonal-Section Shell Towers

Seong-Mi Park¹ and Byung-Ho Choi^{1*}

¹Division of Civil Engineering, Hanbat National University

요 약 일반적으로 활용되고 있는 원통형 단면셀 구조로 이루어진 타워구조의 대형화에 한계가 있어 다각형 단면셀 기둥구조의 활용이 대두되고 있다. 현재 대형 다각형 단면셀 기둥구조의 국부좌굴강도에 대한 자료가 충분치 않고 관련 기준이나 지침이 명확히 제시되고 있지 않은 실정이다. 이에 3차원 유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용한 다양한 변수해석 모델을 수립하여 탄성좌굴 및 비선형비탄성 변수해석을 수행하였다. 이 때, 단면제원은 대형 풍력발전 타워 기둥구조에 적용하는 것을 가정하여 선정하였고, 다각형의 각형 수, 잔류응력의 크기 및 분포특성, 강제 항복강도 등의 변수를 고려한 해석결과를 토대로 다각형 단면셀 기둥구조의 국부좌굴 특성을 분석하였다. 본 변수해석 연구 결과로부터 세부적인 잔류응력 분포양상 보다는 잔류응력의 최대크기가 축방향 압축을 받는 다각형 쉘의 국부좌굴강도에 중요한 영향인자인 것을 알 수 있다. 다각형 단면 쉘 구조의 국부좌굴강도는 4변 단순지지된 평판구조의 기준을 적용하여 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract Since the subpanels of polygonal-section shell have the corners of an obtuse angle larger than 90 degree unlike general plate or box-section structures, this could have an influence on forming nodal lines against local plate buckling or stress distributions. However, there is not sufficient material in the relevant study results or design recommendations. The very feasible models of the initial imperfections were acquired through the literature studies and then the parametric studies were conducted along with the initial imperfection models by using the finite element method. The parameters like the size of residual stresses, the portion of compressive residual stresses, and steel grades were considered. From the parametric studies, it was found that the maximum residual stress is more influential factor than the distribution pattern of residual stresses. In addition, The design strength equations for the simply supported plates can be applicable to the determination of the local buckling strength of the polygonal cross-section shell structures.

Key Words : Inelastic buckling, Design strength, Finite element analysis, Nonlinear-analysis, Polygonal section, Residual stress, Ultimate strength

1. 서론

다각형 쉘 기둥의 서브패널은 모서리 사이에서 둔각으

로 접합되는 경계조건에 의해 국부좌굴 거동의 고정점 형성이나 응력분포에 기존 평판 구조나 박스단면 구조와는 다른 특성이 있을 수 있다. 또한, 광폭 후판을 이용한

본 논문은 2010년도 한밭대학교 교내학술비의 지원을 받았음.

*Corresponding Author : Byung-Ho Choi

Tel: +82-42-821-1105 email: bhchoi@hanbat.ac.kr

접수일 12년 01월 27일

수정일 12년 03월 12일

게재확정일 12년 04월 12일

대형 다각형 셸 부재의 제작과정에 따라 초기변형이나 잔류응력 등 초기불완전성에 있어 상당한 차이가 발생할 수 있다(Migita와 Fukumoto(1997)[1], Aoki 등(1991)[2]). 이러한 초기 불완전성의 차이는 기둥의 국부좌굴강도에 영향을 미칠 것으로 예상되지만, 이에 관한 연구결과나 이의 영향을 구체적으로 고려하는 지침은 제시되고 있지 않다(Highway Bridge Design Specifications(2010), AASHTO LRFD (2007), DIN code(1996))[3-5].

본 논문에서는 용접 제작에 의한 초기상태 변화로 인한 다각형 셸 타워구조의 국부좌굴강도 영향에 대해 정량적으로 검토해 보고자 한다. 6각형, 8각형, 10각형, 12각형의 단면 셸 구조에 대해 최근에 개발된 용접구조용 고성능 강종인 HSB500과 HSB600의 재료특성을 반영하여 변수연구를 수행하였다. 단면제원은 기존 풍력타워의 설계 문헌을 참고로 하여 선정하였고(Lavassas(2003)[6]), 초기불완전성에 따른 변수해석 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 다각형 셸 구조의 초기불완전성에 대해서는 문헌 조사를 실시한 결과로부터 적합한 모형을 선정하였다. 초기불완전성을 고려한 비선형 수치해석은 상용화된 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다.

2. 해석모델

2.1 형상 및 제원

이 논문의 다각형 셸 기둥 해석모델은 반경 2m의 원에 내접하는 6, 8, 10, 12각형 단면을 대상으로 하였다. 원통형 단면 셸 구조에 적용되는 통상적인 링스티프너의 간격을 참고하여 모델의 길이 L은 10,000mm로 설정하였다. 구체적인 해석모델의 제원 및 형상을 다음 표 1, 2와 그림 1에 나타내었다. 여기서 r 은 외접원의 반지름, b_i 는 서브패널의 유효 폭, t 는 두께, b_i/t 는 유효 폭-두께비를 의미한다.

압축을 받는 평판 부재는 유효 폭-두께비에 따라 조밀 단면, 비조밀 단면, 세장 단면으로 구분되며 각 영역에 따라 좌굴거동 특성이 달라지고 기준강도의 적용 방식이 달라지므로(AASHTO LRFD(2007)[4], DIN Code (1997)[5]), 세 가지 단면 영역에 고루 분포되도록 해석모델의 단면을 설계하였다. 이 때, 단면영역의 구분은 미국의 AASHTO LRFD(2007)[4] 설계기준을 참조하였다.

[표 1] 다각형 셸 단면제원

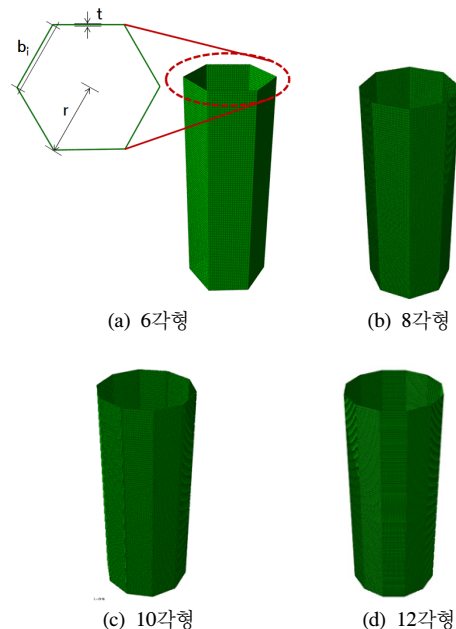
[Table 1] Polygonal shell cross-section data

각형	기준반경 r (mm)	서브패널의 수	유효폭 b_i (mm)
6	2000	6	2000.0
8	2000	8	1530.7
10	2000	10	1236.1
12	2000	12	1035.3

[표 2] 해석 모델 제원

[Table 2] Analysis model data

F_y (MPa)	단면 구분	6각형		8각형		10각형		12각형	
		b_i/t	t (mm)	b_i/t	t (mm)	b_i/t	t (mm)	b_i/t	t (mm)
355	조밀	25.0	80	21.9	70	22.9	54	25.9	40
	비조밀	40.0	50	40.3	38	41.2	30	37.0	28
	세장	62.5	32	63.8	24	61.8	20	64.7	16
450	조밀	23.3	86	21.3	72	19.3	64	22.5	46
	비조밀	35.7	56	36.4	42	36.4	34	34.5	30
	세장	58.8	34	54.7	28	56.2	22	57.5	18

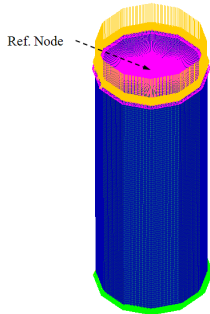


[그림 1] 모델 단면도

[Fig. 1] Cross-sectional Drawing

2.2 유한요소모델링

강재의 재료특성은 탄성계수는 210,000MPa, 프아송비는 0.3을 적용하였으며, 완전탄소성거동을 가정한 Von-Mises 항복이론을 적용하였다. 이 때, 각 강종별 항복강도는 HSB500은 355MPa, HSB600은 450MPa로 반영하였다. 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[7~9]에서 제시하는 쉘 요소 S4R5을 적용하여 해석모델의 서브패널 폭에 최소 20개, 길이방향으로 100개의 요소로써 분할하여 요소망을 구축하였다. 전체 단면에 균일한 압축응력이 축방향으로 재하되도록 하였고, 경계조건은 하부는 단순지지 고정조건을, 상부 끝단면에 위치한 각 절점의 자유도는 축방향을 제외한 면내 방향에 대해 상대적으로 구속되도록 구성하여 국부좌굴 거동에 중점을 두도록 하였다.(그림 2)



[그림 2] 12각형 단면 모델링 형상
[Fig. 2] Dodecagon cross-section modeling shape

3. 초기불완전성 모형

본 논문의 비선형 변수해석 수행 위한 초기불완전성 모형은 초기변형과 잔류응력으로 구분하여 고려하였으며, 각각 다음과 같다.

3.1 초기변형

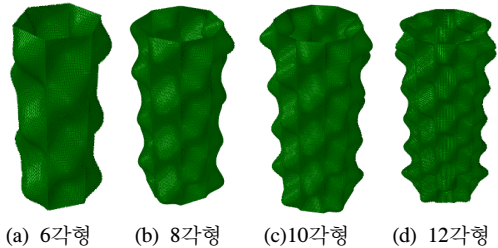
평판 부재의 국부좌굴강도는 지지점 사이의 면외 변형에 의해 영향 받는다. 따라서, 제작과정에서 발생하는 평판 부재의 면외 변형은 기준코드에 의해 제한된다. 다각형 쉘 구조의 국부좌굴은 각 모서리 사이의 서브패널 평판의 면외 변형 크기에 의해 영향 받을 것으로 판단된다. DIN code(1996)[5]는 용접 제작된 평판구조의 초기변형을 아래 식 (1)과 같이 제한하고 있다.

$$f = \frac{l_m}{250}, \text{ 여기서 } a > 2b_i, l_m = 2b_i \quad (1)$$

$$\therefore f = \frac{2b_i}{250} = \frac{b_i}{125}$$

AASHTO LRFD (2007)[4]에서는 초기변형의 크기로 $b_i/120$ 을 제시하고 있으며, 이는 본 연구에서 고려한 식 (1)과 유사한 수준이다.

본 연구에서 해석 모델의 초기변형의 최대 크기는 DIN code(1996)[5]에서 제시한 식 (1)을 준용하여 다각형 서브패널의 폭 b_i 의 1/125로써 고려하였다. 이 크기의 비율로써 고유치 해석을 통해 얻은 그림 3과 같은 1차 좌굴모드를 보정하여 초기변형 모형을 얻었으며 이를 비선형 해석 시에 적용하였다.



(a) 6각형 (b) 8각형 (c) 10각형 (d) 12각형
[그림 3] 탄성좌굴해석 1차 좌굴모드
[Fig. 3] Elastic buckling analysis first buckling mode

3.2 잔류응력

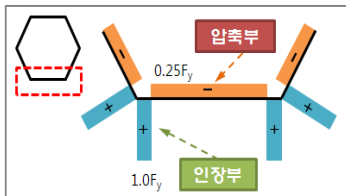
본 논문에서는 강재 후판을 모서리에서 용접하여 다각형 쉘 타워구조를 이루는 가장 기본적인 제작방법에 대해 고려하였다. 이 때 각 서브패널에 발생하는 잔류응력 양상은 단면의 양 단을 용접한 평판구조에서 발생하는 잔류응력 패턴과 유사할 것으로 가정할 수 있다. 이러한 경우, 용접한 부위에서는 인장잔류응력, 그 외 부분에서는 압축잔류응력이 발생하며 이들은 서로 평형을 이루게 된다. 이 때, 인장잔류응력은 최대 강재의 항복강도에 까지 이르는 것으로 보고되고 있으나, 압축잔류응력에 대해서는 문헌마다 다소 차이가 있다. AASHTO LRFD(2007)[4]의 설계기준강도 공식에서는 압축잔류응력을 강재 항복강도의 40%까지 고려하도록 하고 있다. Chou 등(2006)[10]은 보강재 용접에 의해 평판의 중앙부, 즉, 비용접부에서는 압축잔류응력이 강재 항복강도의 25%, 용접부에서는 항복강도의 100%에 달하는 인장잔류응력이 발생하는 모형을 제시하였다. Grodin 등(1998, 1999)[11, 12]은 비용접부에서는 압축잔류응력이 항복강도의 15% 내지는 30%로 변동될 수 있음을 조사하여 제시하였다.

Fukumoto(1997)[13]는 표 3과 같이 강재의 항복강도가 증가할수록 압축잔류응력이 감소하는 특성을 제시하고 있다.

[표 3] 강종별 항복강도에 대한 압축잔류응력비
[Tabel 3] The compressive residual stress ratio about yield strength by steel grade

강 종	F_{yc} [N/mm ²]	F_{rc}/F_{yc}
SS400	235	0.30
SM490	315	0.25
SM520	355	0.23
SM570	450	0.20

기존 연구의 문헌조사 결과를 토대로, 본 연구의 해석 모델에서 HSB500 강재 적용 시에는 최대 압축잔류응력이 항복강도의 25%, HSB600 강재 적용 시에는 20%가 되도록 각각 구분하여 고려하였다. 최대 인장잔류응력은 항복강도의 100%로써 고려하였다. 예로써, HSB500 6각형 단면 셸 타워구조의 최대 잔류응력 모형은 아래 그림 4와 같이 고려되었다.



[그림 4] 6각형 셸 단면의 잔류응력 발생 모형 (HSB500)

[Fig. 4] Residual stress model of the Hexagon Shell Cross-section (HSB500)

4. 잔류응력 크기에 따른 변수해석 연구

4.1 변수 해석방법

잔류응력의 크기에 따른 국부좌굴강도의 변화를 살펴 보기 위해, 이의 절대 값을 달리하며 변수해석을 수행하였다. 표 4에 나타낸 바와 같이, 인장잔류응력은 강재 항복강도를 기준으로 최소 0%에서 최대 100%까지 변화를 주도록 하였으며, HSB600 적용 모델의 압축잔류응력은 강재 항복강도의 0~20%, HSB500 적용 모델의 압축잔류응력은 항복강도의 0~25%가 되도록 각각 고려하였다.

[표 4] 잔류응력 크기 변화

[Tabel 4] Residual stress size changes

F _y (MPa)	최대 인장잔류응력		최대 압축잔류응력	
	MPa	항복강도비	MPa	항복강도비
355	355.0	100%	- 88.8	25%
	284.0	80%	- 71.0	20%
	213.0	60%	- 53.3	15%
	142.0	40%	- 35.6	10%
	71.0	20%	- 17.8	5%
	0.0	0%	0.0	0%
450	450.0	100%	- 90.2	20%
	360.0	80%	- 72.2	16%
	270.0	60%	- 54.1	12%
	180.0	40%	- 36.1	8%
	90.0	20%	- 18.0	4%
	0.0	0%	0.0	0%

4.2 해석결과

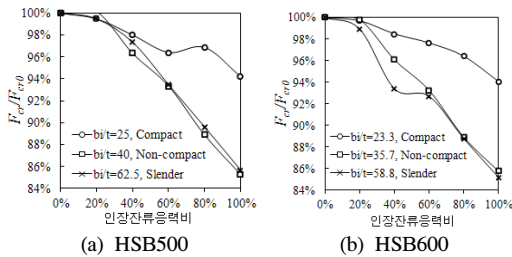
잔류응력을 변화시켜가면서 변수해석을 수행한 결과로부터, 잔류응력의 크기는 다각형 셸구조 서브패널의 국부좌굴강도에 뚜렷한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그림 5~8의 도표들은 항복강도에 대한 잔류응력 크기 비율에 따라 국부좌굴강도의 저감비율을 나타낸다. 여기서, F_{cr0} 는 잔류응력이 0인 경우의 국부좌굴강도를 의미하며, 잔류응력에 의한 강도 저감은 이를 기준한 비율로써 나타내고 있다.

그림 5~8에 있는 각각의 도표들은 조밀단면(compact), 비조밀단면(non-compact) 및 세장단면(slender)에 따른 국부좌굴강도의 변화를 비교해 놓고 있다. 그 중에서 그림 5의 도표들은 6각형 단면 셸 서브패널의 잔류응력 크기에 따른 국부좌굴강도의 변화를 나타내는데, 조밀단면의 경우 최대 5.8%까지 저하되는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 비조밀단면 및 세장단면에서는 각각 최대 14.7% 및 14.3%로 국부좌굴강도의 저하 폭이 크게 증대되었다. 이러한 비교를 통해 다각형 단면 셸의 국부좌굴강도에 대한 잔류응력에 의한 영향이 조밀단면에서 가장 낮게 나타나며, 이 영역에서 응력재분배 성능이 가장 우수한 사실을 알 수 있다. 반면, 비조밀단면 및 세장단면에서 국부좌굴강도의 저감율이 증가하는 것은 유효 폭-두께비 증가에 따라 압축잔류응력에 의한 조기좌굴 거동의 영향이 증가하는 것을 반증한다.

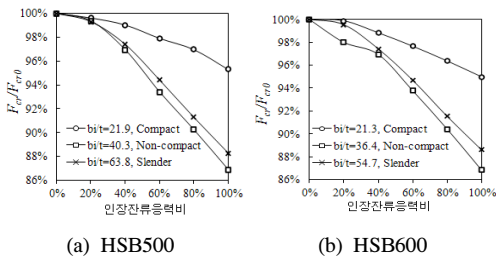
그림 6~8은 각각 8각형, 10각형, 12각형 단면 셸구조 해석모델에서 잔류응력 크기 변화에 따른 국부좌굴강도의 변화 특성을 보여주고 있으며, 앞서 6각형 단면 셸구조 해석모델의 변화 특성과 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터, 각형 수에 따라 모서리에서 서브패널의 지지강도가 달라지는 특징은 있지만, 본 변수해석

대상인 12각형 단면까지는 이러한 지지조건의 변화가 서브패널의 국부좌굴모드와 압축강도에 유의미한 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다.

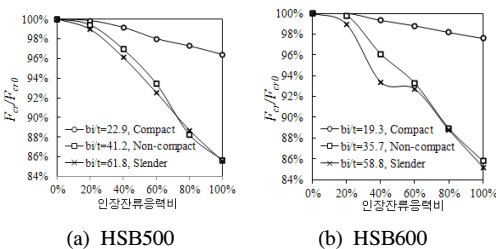
그림 5(a)와 5(b)는 각각 HSB500과 HSB600을 적용한 결과인데, 잔류응력 증가에 의한 압축강도 저감비율의 변동 양상에 있어 두 모델간의 두드러진 차이는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 고강도 강재일수록 다각형 셀 구조의 서브패널에 발생하는 잔류응력의 절대적 크기는 오히려 낮아질 수 있지만 국부좌굴강도의 저감율은 줄어들지 않음에 유의할 필요가 있음을 말해준다.([14,15] 참고)



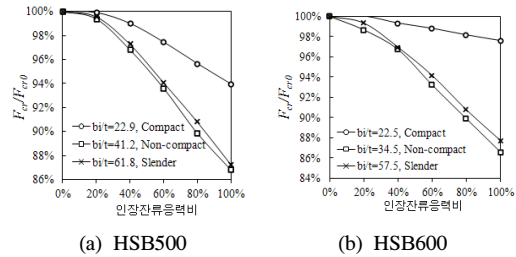
[그림 5] 잔류응력에 따른 국부좌굴강도(6각형)
[Fig. 5] Local buckling strength according to the residual stress(Hexagon)



[그림 6] 잔류응력에 따른 국부좌굴강도(8각형)
[Fig. 6] Local buckling strength according to the residual stress(Octagon)



[그림 7] 잔류응력에 따른 국부좌굴강도(10각형)
[Fig. 7] Local buckling strength according to the residual stress(Decagon)



[그림 8] 잔류응력에 따른 국부좌굴강도(12각형)
[Fig. 8] Local buckling strength according to the residual stress(Dodecagon)

5. 잔류응력 분포비율에 따른 변수해석 연구

5.1 해석방법

앞서 3절에서 볼 수 있듯이, 다각형 셀의 서브패널과 같은 평판 부재에서 용접 제작에 의한 최대 인장잔류응력은 일반적으로 강제 항복강도에 이르는 것으로 알려졌지만, 최대 압축잔류응력은 항복강도의 15.0%에서 50.0% 까지 이르는 등 기존 연구결과에 있어 상당한 차이를 보인다. 최대 압축잔류응력이 달라지면 인장잔류응력과의 평형 조건에 따라 압축 잔류응력의 발생영역에 있어 차이가 발생하게 된다. 다시 말해, 최대 압축잔류응력의 크기와 발생영역 사이에는 서로 반비례 관계가 성립된다. 본 절에서는 인장잔류응력을 발생가능한 최대값인 항복강도로 고정하고 압축잔류응력의 최대 크기를 달리하며 잔류응력의 분포특성에 따른 국부좌굴강도에 대한 영향을 변수 해석적으로 검토하였다. 각 해석모델은 HSB500 및 HSB600 등 두 가지 강종이 적용되었으며, 조밀단면에 해당되는 유효 폭-두께비를 갖도록 설계되었다. 그림 9는 HSB500이 적용된 변수해석 모델의 잔류응력 분포 특성을 나타낸다.

그림 9는 HSB500강종의 6각형 모델을 제시한 것으로, 여기서 잔류응력비는 강제 항복강도에 대한 최대 잔류응력의 크기 비율을 의미한다. 압축잔류응력비 25%, 인장잔류응력비 100%의 잔류응력 모형과 비교했을 때, 압축잔류응력비를 12.4%로 감소시키면 인장잔류응력이 발생하는 영역은 전체 폭의 20%에서 11%로 감소된다. 이와 상반되게 압축잔류응력비가 37.6%로 증가되면 인장잔류응력의 발생 영역은 전체 폭의 27.3%로 증가된다. 이와 유사하게 HSB600 모델에서는 압축잔류응력비 20%, 인장잔류응력비 100%인 상태를 기준으로 했을 경우 압축잔류응력비를 10%로 감소하게 되면 인장잔류응력이 발

생하는 영역은 전체 폭의 16.7%에서 9.1%로, 압축잔류응력비를 30%로 증가시키면 인장잔류응력의 영역비율은 전체 폭의 23.1%로 증가된다.

모델명	HSB500-6-1	HSB500-6-2	HSB500-6-3
6각형, 355MPa			
인장잔류응력 영역비	11%	20%	27.3%
압축잔류응력비	12.4%	25%	37.6%
인장잔류응력비	100%		

[그림 9] 잔류응력 분포 특성(HSB500, 6각형)
[Fig. 9] Residual stress distribution(HSB500, Hexagon)

이러한 해석모델의 압축잔류응력비 변화에 따른 인장 및 압축영역의 변화는 10각형 셀의 경우 표 5와 같이 산출된다. 이 때 10각형의 총 유효폭은 1236.1mm에 이르나, 각 해석모델별로 인장잔류응력과 작용하는 폭과 압축 잔류응력이 작용하는 폭이 달라지는 것을 볼 수 있다. 인장잔류응력과 압축잔류응력이 서로 평형을 이루도록 각각의 크기를 산출하여 이를 반영한 변수 해석을 수행하였다.

[표 5] 잔류응력 분포비율 변화 모델(10각형)
[Table 5] Residual stress distribution ratio change model (Decagon)

모델명	영역폭(mm)		잔류응력(MPa)	
	인장	압축	인장	압축
HSB500-10-1	136.0	1100.1	355.0	-43.9
HSB500-10-2	247.2	988.9	355.0	-88.8
HSB500-10-3	337.4	898.6	355.0	-133.3
HSB600-10-1	112.5	1123.6	450.0	-45.0
HSB600-10-2	206.4	1029.6	450.0	-90.2
HSB600-10-3	285.5	950.5	450.0	-135.2

5.2 해석결과

다각형 셀 서브패널의 잔류응력 분포 특성, 즉 인장 및 압축 잔류응력의 영역비 변화에 따른 국부좌굴강도 해석 결과를 표 6~8에 나타내었다. 표 6~8은 각각 6각형, 8각형, 10각형 단면 셀 해석모델의 결과를 보여주고 있다. 이러한 비교해석을 통해 최대 압축잔류응력이 낮은 모델

에서 국부좌굴강도에 대해 다소 유리한 결과를 주는 것을 알 수 있다. 6각형 모델에서는 HSB500 강재 적용 시에 최대 2%, HSB600 강재 적용 시에는 최대 1.65% 수준의 국부좌굴강도의 증가가 관찰되고 있으나, 8각형 및 10각형 모델에서는 최대 증가비율이 1% 수준에 머무르고 있다. 즉, 최대 압축잔류응력이 줄어들수록 압축잔류응력의 영역이 증가하게 되고 반대로 최대 압축잔류응력이 커질수록 압축 영역이 줄어드는 상반된 효과로 인해, 압축잔류응력의 발생크기 변화가 다각형 셀 서브패널의 국부좌굴강도에는 유의미한 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

[표 6] 잔류응력 영역비에 따른 국부좌굴강도(6각형)
[Table 6] Local buckling strength by the residual stress distribution ratio (Hexagon)

모델명	F_y	b_f/t	해석결과 (MPa)	비교
HSB500-6-1	355MPa	25.0	330.73	2.15%
HSB500-6-2	355MPa	25.0	323.78	0.00%
HSB500-6-3	355MPa	25.0	322.83	-0.29%
HSB600-6-1	450MPa	23.3	416.71	1.65%
HSB600-6-2	450MPa	23.3	409.93	0.00%
HSB600-6-3	450MPa	23.3	413.00	0.75%

[표 7] 잔류응력 영역비에 따른 국부좌굴강도(8각형)
[Table 7] Local buckling strength by the residual stress distribution ratio (Octagon)

모델명	F_y	b_f/t	해석결과 (MPa)	비교
HSB500-8-1	355MPa	21.9	328.12	1.22%
HSB500-8-2	355MPa	21.9	324.16	0.00%
HSB500-8-3	355MPa	21.9	324.38	0.07%
HSB600-8-1	450MPa	21.3	411.65	1.07%
HSB600-8-2	450MPa	21.3	407.30	0.00%
HSB600-8-3	450MPa	21.3	403.63	-0.90%

[표 8] 잔류응력 영역비에 따른 국부좌굴강도(10각형)
[Table 8] Local buckling strength by the residual stress distribution ratio (Decagon)

모델명	F_y	b_f/t	해석결과 (MPa)	비교
HSB500-10-1	355MPa	22.9	335.49	0.83%
HSB500-10-2	355MPa	22.9	332.73	0.00%
HSB500-10-3	355MPa	22.9	332.99	0.08%
HSB600-10-1	450MPa	19.3	432.64	0.47%
HSB600-10-2	450MPa	19.3	430.63	0.00%
HSB600-10-3	450MPa	19.3	430.763	0.03%

6. 맺음말

본 논문은 용접 제작에 의한 초기 잔류응력 변화에 따른 6각형, 8각형, 10각형, 12각형의 다각형 셸 타워구조의 국부좌굴강도에 대한 영향을 살펴보기 위해 최근에 개발된 용접구조용 고성능 강종인 HSB500과 HSB600의 재료특성을 반영하여 변수연구를 수행하였다. 단면제원은 대형 풍력발전 타워 기둥구조에 적용하는 것을 가정하여 선정하였고, 초기불완전성을 고려한 비선형 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. 이러한 변수 해석적 검토를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 용접제작 된 6~12각형의 단면 셸 기둥구조를 대상으로 잔류응력의 크기에 따른 국부좌굴강도의 영향을 살펴보았다. 조밀단면에서 잔류응력의 영향으로 국부좌굴강도가 5% 내외 수준으로 저감하였으며 비조밀단면 및 세장단면에서는 국부좌굴강도의 저감율이 최대 15% 수준에 이르는 것으로 나타났다. 이는 유효 폭-두께비가 조밀단면 이상으로 증가하면 잔류응력에 의한 민감도가 증가하는 것을 반증하며, 이 범위에서 잔류응력을 줄일 수 있다면 설계기준강도의 증진을 피할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 각형 수에 따라 모서리에서 서브패널의 지지각도가 달라지는 특징은 있지만, 12각형 단면까지는 이러한 지지조건의 변화가 서브패널의 국부좌굴모드와 압축강도에 유의미한 영향을 주지 않는 것으로 본 변수해석 연구결과로부터 확인되었다. 따라서, HSB600강종의 후판이 적용된 12각형 다각형 단면 셸 구조의 국부좌굴강도는 4변 단순지지된 평판구조에 대한 기준을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, HSB500과 HSB600 후판을 적용해서 비교해 본 결과 고강도 강재일수록 다각형 셸 구조의 서브패널에 발생하는 잔류응력의 절대적 크기는 다소 낮아질 수 있더라도 국부좌굴강도의 저감율은 달라지지 않음에 유의할 필요가 있다.
- (3) 인장잔류응력을 발생가능한 최대수준인 강재의 항복강도로 고정하고 압축잔류응력의 크기를 변화시켜가며 잔류응력의 분포특성에 따른 변수해석을 실시한 결과, 국부좌굴강도에 큰 차이를 나타내지 않았다. 이러한 결과는 세부적인 잔류응력의 분포양상 보다는 잔류응력의 최대크기가 축방향 압축을 받는 다각형 셸의 국부좌굴강도에 대한 주요 영향인자임을 알 수 있다.

References

- [1] Migita, Y. Fukumoto, Y., "Local buckling behavior of polygonal sections", J. Construct. Steel Res. Vol. 41, No.2-3, pp. 221-233, 1997.
- [2] Aoki, Y. Migita, Y. Fukumoto, Y. "Local Buckling Strength of Closed Polygon Folded Section Columns", J. Construct. Steel Res. Vol. 20, pp. 259-270, 1991.
- [3] Korea Road and Transportation Association, Highway Bridge Design Specifications, 2010
- [4] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C., 2007.
- [5] DIN code 18800-1/A1, Structural steelwork Design and construction Amendment A1, Feb. 1996
- [6] Lavassas, I. Nikolaidis, G. Zervas, P. Efthimiou, E. Doudoumis, I.N. Baniotopoulos C.C. "Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower", Engineering structures, Vol. 25, Greece, pp.1097-1106, 2003.
- [7] ABAQUS, Keywords Reference Manual, Version 6.11, 2011.
- [8] ABAQUS, Theory Manual, Version 6.11, 2011.
- [9] ABAQUS, Analysis User's Manual, Version 6.11, 2011.
- [10] Chou, C. C. Uang, C. M. Seible, F. "Experimental Evaluation of Compressive Behavior of Orthotropic Steel Plates for the New San Francisco-Oakland Bay Bridge", Journal of bridge engineering, 2006
- [11] Grondin G.Y., Chen Q, Elwi AE, Cheng J.J.R., "Stiffened steel plates under compression and bending, Journal of Constructional Steel Research" Vol.45 No.2 pp.125-148, 1998.
- [12] Grodin, G.Y., Elwi, A.E., Cheng, J.J.R., "Buckling of stiffened steel plates-a parametric study", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 50, pp. 151-175, 1999.
- [13] Fukumoto, Y., Structural stability design : steel and composite structures, 1997.
- [14] Jimin, Son, Jongsub, Park, "A Study on Moment Gradient Factor for Inelastic Lateral-Torsional Buckling of Stepped I-Beam Subjected to Uniformly Distributed Load and End Moment", Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. :9 No.4, pp. 1-9, 2009.
- [15] Kathleen Mae Gelera, Jongsub, Park, "Moment Gradient Factor for Lateral Torsional Buckling Strength of Monosymmetric Stepped I-beam Subjected to Uniform Moment", Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 10 No.2 pp. 7-13, 2010.

최 병 호(Byung-Ho Choi)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 대학원 토목공학과 (토목공학석사)
- 2002년 12월 : Auburn University (구조공학박사)
- 2003년 11월 ~ 2008년 3월 : 포항산업과학연구원 선임연구원
- 2008년 4월 ~ 2009년 8월 : 포항산업과학연구원 책임연구원

- 2009년 9월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목환경도시공학부 토목공학과 교수

<관심분야>

복합소재공학, 강구조공학

박 성 미(Seong-Mi Park)

[준회원]



- 2012년 2월 : 한밭대학교 산업대학원 토목공학과 (토목공학석사)

<관심분야>

구조공학, 강구조공학