ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2021.21.4.57

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 21, No. 4 (통권 86호), pp.57~64, December, 2021

제형 및 사인형 주름 강판의 초기 불완전 형상을 고려한 전단 좌굴 특성 비교

A Comparitive Study on the Shear Buckling Characteristics of Trapezoidal and Sinusoidal Corrugated Steel Plate Considering Initial Imperfection

서 건 호* 손 수 덕** 이 승 재***
Seo, Geonho Shon, Sudeok Lee, Seungjae

Abstract

This paper conducted a comparative analysis of the shear buckling characteristics of trapezoidal and sinusoidal corrugated steel plates considering of their initial imperfection. Initial imperfection refers to the state where the shape of the corrugated plate is initially not perfect. As such, an initially imperfect shape was assumed using the eigen buckling mode. To calculate the buckling stress of corrugated steel plates, the linear buckling analysis used a boundary condition which was applied to the plate buckling analysis. For the comparison of trapezoidal and sinusoidal corrugation, the shape parameters were assumed using the case where the length and slope of each corrugation were the same, and the initial imperfection was considered to be from 0.1% to 5% based on the length of the steel plate. Here, for the buckling analysis, ANSYS, a commercial FEA program, was used. From the results of buckling analysis, the effect of overall initial imperfection showed that the larger the initial imperfection, the lower the buckling stress. However, in the very thin model, interaction or local buckling was dominant in the perfect shape, and in this case, the buckling stress did not decrease. Besides, the sinusoidal model showed higher buckling stress than the trapezoidal one, and the two corrugation shapes decreased in a similar way.

Keywords : Corrugated steel plate, Shear buckling, Critical buckling stress, Linear buckling, Initial imperfection, Eigen value, Eigen buckling mode

1. 서론

건축 구조물의 경량화와 시공비 절감을 위한 방법으로 강재를 이용한 구조물은 효과적인 결과를 얻을 수 있으며, 지금도 그 기술의 발전은 지속해서 이루어지고 있다. 기둥이나 보로 구성된 프레임 구조의 경우, 수평 방향의 힘의 저항을 위해서는 판 요소보다 브레이스를 사용하는 경우가 많으며, 그 이유는 인장인 힘의 효과만을 이용하기 때문에 쉽게 적용된다. 그러나 평판의 경우 다양한 방법으로 저항할 수 있도록 설계할 수는 있지만, 수평 전단 저항에 필요한 조건을 만족하는 평판을 강판으로 사용할 경우, 전단 좌굴(shear buckling)에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 부담스러운 두께를 가져야만 한다. 이러한 이유로 강판은 형상의 변화를 통해서 전단 성능을 확보하려는 노력이 많이 시도되었다. 이 중 주름진 강판의 적용은 과거에서부터 많이 시도되었던 결과이며, 항공이나 기계 분야와 더불어 다양한 분야에서 활발하게 적용하였다.[1)]

강재 프레임의 경우 파형강판을 이용한 전단벽(shear wall)으로 사용되기도 하며, 조립형 강부재(built-up steel member)의 경우 웨브(web)에서도 이러한 적용을 살펴볼 수 있다. 기존의 편평한 강판보다 현저하게 얇은 두께로 우월한 전단강성을 확보할 수 있는 장점이 있고, 내력벽의 경우 외장재의 역할과 구조재의 역할을 동시에 할 수 있는 장점도 있다.[2)] 주름 강판의 웨브에 대한 적용도 비교적 얇은 강판임에도 불구하고 잘 저항하도록 개발되었는데 사인형 파형강판의 경우 1.5~6㎜의 두께에도 충분한 강성을 가지도록 설계할 수 있다.[3)]

* 학생회원, 한국기술교육대학교 미래융합공학전공 석사과정
Future Convergence Eng., Koreatech University
** 교신저자, 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과, 연구교수
Dept. of Architectural Eng., Koreatech University
Tel: 041-560-1334, Fax: 041-560-1224
E-mail : sdshon@koreatech.ac.kr
*** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Eng., Koreatech University

과거 파형강판 제작 기술과 용접 기술력의 부족으로 인하여 파형강판에 대한 상용화가 어려웠다. 하지만 다양한 재료의 개발과 자동 제작 기술 및 로봇 용접(welding robots) 기술의 발전 등으로 파형강판의 실용화 사례는 늘고 있으며, 고성능 강재(high performance steel)로의 활용으로 이어지고 있다.[4] 이같이 강판의 두께가 줄어듦으로 발생하는 이득은 주름을 가공하는 비용에 비해서 상대적으로 우세하다면 어떠한 경우라도 구조물의 경량화와 재료 절감을 성취할 수 있을 것이다. 이러한 까닭에 양질의 파형강판을 쉽게 생산하고 적용하도록 하는 방법을 연구하는 것은 매우 중요하다. 그러나 파형강판의 형상을 제작하기 위해 강판을 굽히는 과정이나 냉간 성형의 과정은 정밀한 박판으로 생산하는 데는 한계가 있으며, 설계된 치수대로 생산된 파형강판을 얻는 데는 한계가 있다. 즉, 초기 형상의 불완전함을 수반할 수밖에 없다.

파형강판은 1829년 영국의 Palmer사에서 특허를 받은 시점부터 다양한 분야에 사용되었고[5], 교량이나 공장과 같은 건축 토목 분야에 적용되기 시작하였으며, 독일과 유럽에 많은 실용적인 사례가 나타났다. 구조설계는 독일이나 유럽에서 설계 기준을 잘 제시하고 있지만[6], 전단 좌굴의 평가는 다소 차이가 있었다. 주름판의 좌굴은 크게 전체(global)좌굴, 국부(local)좌굴 그리고 두 좌굴의 연성(coupling)작용 효과로 나누어진다. 최근 주름판의 연구 중에는 Fereshteh et al.(2013), Laszlo et al.(2014), Yoo(2016)[7)-9)] 등에 의해 내진 성능에 관한 연구가 수행되었으며, 전단 좌굴을 분석하기 위한 연구는 Abbas et al.(2002), Anamia et al.(2005), Abbas et al.(2007a,b), Yi et al.(2008), Ibrahim(2006, 2014)[4),10)-14)] 등이 수행하였다.

국내에서는 2000년대 이후 파형 웨브의 교량이 건설되기 시작하면서 기초적인 연구가 수행되었다. 파형강판과 같이 전단응력에 저항하는 경우, 임계 하중을 초과하게 되면 좌굴이 발생하게 되므로 좌굴에 대한 검토를 수행한다. 파형강판은 크게 원형[15)], 제형(Trapezoidal)[2)], 정현형(Sinusoidal)[1)] 등의 형상이 많이 생산되고 적용된다.

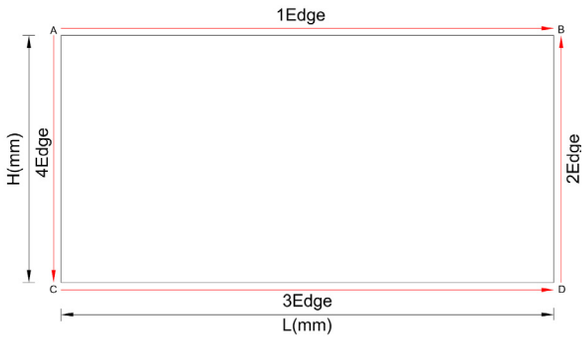
파형강판의 전단 설계를 위한 전단 좌굴의 이론식들은 평판의 좌굴이론식을 보완하여 전체좌굴과 국부좌굴로 나누어 평가한다. 그러나 연성좌굴에 대해서는 다양한 평가기준을 제시하고 있다. 최근 선형좌굴해석(linear buckling anaysis)을 통한 파형강판의 전단좌굴 평가는 기존의 이론식을 보완하는 방법을 제안할 수 있었다.[16)] 주로 전단 좌굴 경향성을 분석하고 이론적 좌굴 값과의 차이에서 임계치를 결정하는 식들을 제안하고 있다.[9),15),16)] 그러나 이들의 형상은 정해진 완전한 형상에 관한 수치적 연구이었고, 형상의 불완전함에 대한 부분은 다루지 않고 있다. 최근 초기불완전성으로 인한 전단 좌굴의 영향이 연구되었다.[17)] 이 문헌은 선형좌굴해석을 통한 고유좌굴모드의 초기불완전성을 고려하였고, 최대 수평변위와의 관계를 통해서 그 영향을 평가하였다. 그러나 대상 모델은 제형 주름이며, 하나의 치수만을 고려하여 시뮬레이션하였고, 초기불완전성에 대한 선형좌굴해석의 재평가는 수행하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 이러한 초기불완전성에 대한 영향의 평가를 제형과 사인형 주름 강판을 대상으로 수행하도록 하며, 이들의 형상에 대한 비교와 임계레벨의 변화를 살펴보도록 한다. 좌굴해석을 통해 예측된 좌굴모드를 이용하여 불완전성을 고려하도록 하며, 이들의 형상에서의 좌굴해석을 통해 그 값의 변화를 살펴보도록 한다. 이를 통해서 좌굴의 패턴과 임계 내력의 변화에 대한 고찰을 수행하도록 한다. 본 논문의 구성은 2장에서 고유치 해석을 위한 가정과 평판의 결과를 통한 경계를 결정하도록 하며, 3장~4장에서 초기불완전성이 고려된 제형 및 사인형 주름강판의 좌굴내력을 비교하며, 해석 결과를 토대로 5장에서 결론을 도출하도록 한다.

2. 해석대상 모델과 경계조건

파형강판의 전단 좌굴응력을 구하는 방법은 평판의 전단 좌굴 이론식을 이용하여 구할 수 있다. 파형강판을 등가직교이방성 재료로 가정하여 주름 방향과 주름 직각 방향의 강성을 따로 계산하여 강판의 좌굴을 결정한다. 이 값은 주름진 각 판에서 발생하는 국부적인 좌굴내력과 비교하여 더 낮은 값을 좌굴응력으로 결정한다. 또한, 연성 작용에 의한 좌굴은 이 두 값을 조합하여 계산하고, 이 방법들은 다양하게 설명되고 있다.[9)] 그러나, 유한요소해석(FEA)을 이용한 경우, 고유치 해석으로 전단 좌굴응력(Buckling stress)을 계산할 수 있으며, 이 해석을 선형좌굴해석(linear buckling analysis)이라고 한다. 본 연구에서는 이러한 좌굴해석을 수행하기 위해서 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하도록 하였다.

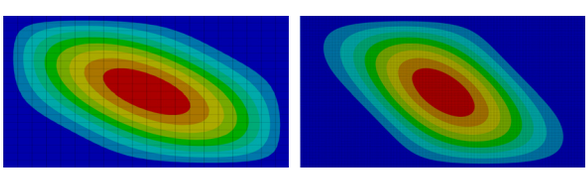
주름 강판의 전단 좌굴응력 검증을 수행하기에 앞서 좌굴 해석에서의 유한 요소와 하중 조건과 경계조건을 결정하기 위해서 평판의 경우에 대한 좌굴 해석을 수행하였고, 이때 사용된 파라미터들을 주름판의 해석에 적용하도록 하였다. 여기서, 적용될 평판의 형상은 〈Fig. 1〉과 같다.



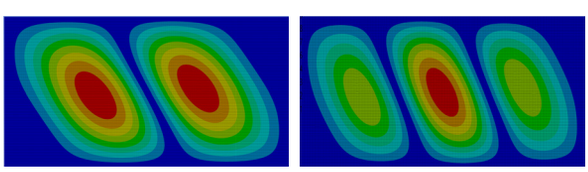
〈Fig. 1〉 Steel Plate Boundary Condition

〈Table 1〉 Boundary Condition

Boundary Condition		1Edge	2Edge	3Edge	4Edge
Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
	Y	Free	Free	Free	Fix
	Z	Fix	Fix	Fix	Fix
Rotation	X	Free	Free	Free	Free
	Y	Free	Free	Free	Free
	Z	Free	Free	Free	Free



(a) 1000mm (b) 2000mm



(c) 3000mm (d) 4000mm

〈Fig. 2〉 Steel Plate FEM Result

평판의 높이 H은 1,000mm이며, 길이 L은 〈Fig. 2〉에서 보는 바와 같이 H, 2H, 3H, 4H를 사용하였다. 경계조건은 순수 전단 변형을 고려하였으며, 〈Table. 1〉에서 보는 바와 같다. 해석에 사용된 유한 요소(finite element)는 박판의 쉘(thin shell) 구조에 적합한 8절점 6자 유도의 Shell281 요소이다. 평판의 물성치로는 탄성계수 E=210,000MPa, 포아송 비 ν=0.3을 적용하였다. 적용되는 하중은 〈Fig. 1〉에서 보는 바와 같이 B, C 방향으로 단위 길이당 1N의 분포하중을 적용하였다. 결과의 검토를 위한 전단 좌굴응력 이론식은 R.V. Southwell이 제시한 것으로 다음과 같다.

$$\tau_{cr} = K_v \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{b})^2$$
$$K_v = 5.34 + 4(\frac{b}{a})^2 \quad (1)$$

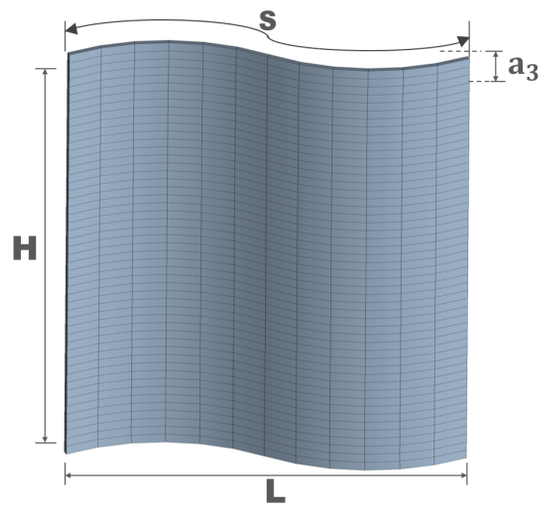
여기서, 밑변 a와 높이 b는 $a > b$이다.

평판의 1차 좌굴모드에 대한 해석 결과를 〈Fig. 2〉에 나타내었다. 또한, 좌굴 응력은 이론값과 함께 〈Table 2〉에 나타내었다. 해석 결과에서 볼 때, 전체 평판의 길이 L이 커질수록 전단 좌굴 응력이 작아진다. 전단 좌굴 강도는 이론값과 해석 값과의 오차가 〈Table 2〉에서 보는 바와 같이 그리 크지 않으며, 신뢰할 수 있는 수준이었다.

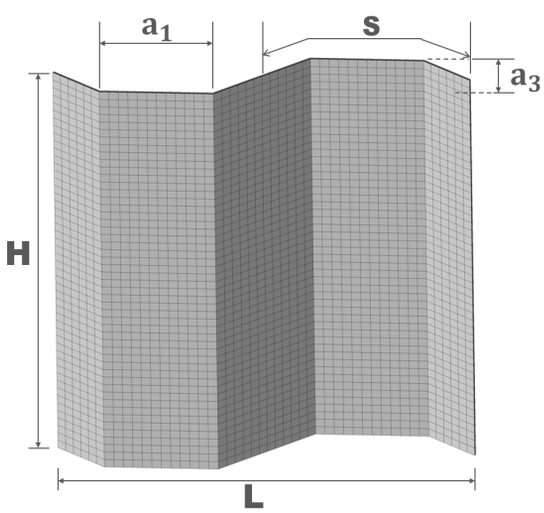
〈Table 2〉 Eigenvalue Buckling Result

	Theory τ_{cr} (MPa)			FEM Result (MPa)		
t(mm) / L(mm)	1	5	10	1	5	10
1000	1.77	44.32	177.27	1.77	44.07	175.43
2000	1.20	30.08	120.33	1.24	31.01	123.76
3000	1.10	27.45	109.79	1.11	27.67	110.42
4000	1.06	26.52	106.10	1.07	26.65	106.35

따라서 최종적으로 앞서 해석한 평판의 경계조건과 하중의 형태를 주름 강판에 적용하여 해석을 진행하였다. 해석을 위한 주름 강판 모델은 제형 및 사인형 주름 강판의 비교를 위해 Yoo(2016)[9] 문헌을 토대로 건축 구조물에서 주로 적용되는 사인형 강판과 제형 주름 강판을 적용하였으며, 사인형 강판과 동일한 파장의 길이를 갖는 제형 주름 강판에 대해서 다루도록 하였다. 주름 강판의 형상과 그 형상 파라메타는 〈Fig. 3〉과 〈Table 3〉에 나타낸 것과 같다. 사인형 및 제형 주름 강판이 동일한 기하학적 형상을 갖기 위해 반 파장의 곡선 길이를 동일한 값을 가지게 하였으며 각각의 명칭은 그림에서와 같다.



(a) Sinusoidal



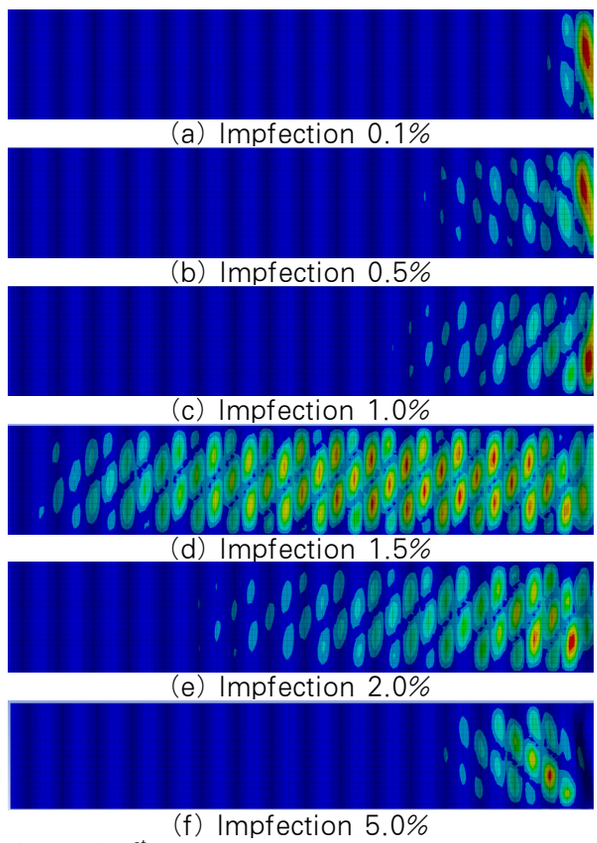
(b) Trapezoidal

〈Fig. 3〉 Shape Parameters of Sinusoidal and Trapezoidal Corrugated Plate

〈Table 3〉 Shape Parameters

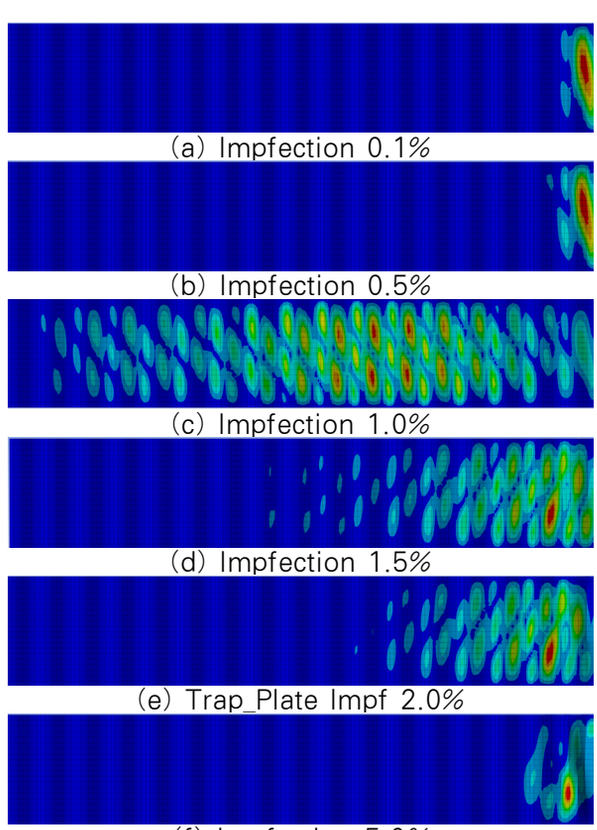
W	a			S	H	L
	$a_{3(s)}$	a_1	$a_{3(t)}$			
116.25	30	58.1	23.8	121	1,000	3,953

또한, 형상의 초기불완전성(imperfection)에 대한 영향은 초기형상에 고유좌굴모드를 적용한 불완전한 형상으로 가정하여 고려한다. 초기 불완전량은 주름판의 높이 1,000mm에 대해 0.1%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 5.0%의 값으로 하였고, 형상의 모드는 고유좌굴모드를 1~3차까지 적용하였다.



(a) Impfection 0.1%
(b) Impfection 0.5%
(c) Impfection 1.0%
(d) Impfection 1.5%
(e) Impfection 2.0%
(f) Impfection 5.0%

〈Fig. 4〉 1st buckling mode of Sinusoidal Plate



(a) Impfection 0.1%
(b) Impfection 0.5%
(c) Impfection 1.0%
(d) Impfection 1.5%
(e) Trap_Plate Impf 2.0%
(f) Impfection 5.0%

〈Fig. 5〉 1st buckling mode of Trapezoidal Plate

〈Table 4〉 Results of Eigenvalue Buckling Analysis (Sinusoidal model)

Impf / t(=mm)	Mode	0%	0.1%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	5.0%
1		160.11 (i)	166.81 (i)	187.60 (i)	186.05 (i)	187.76 (L)	187.07 (L)	182.37 (L)
2		346.38 (G)	342.85 (G)	310.05 (G)	255.24 (G)	206.02 (G)	169.36 (i)	209.46 (i)
3	1st	428.10 (G)	426.40 (G)	409.71 (G)	370.83 (G)	321.80 (G)	414.30 (G)	139.66 (i)
4		462.40 (G)	462.55 (G)	459.18 (G)	461.33 (G)	451.00 (G)	430.12 (G)	270.55 (G)
5		487.60 (G)	487.70 (G)	485.95 (G)	488.84 (G)	488.53 (G)	483.92 (G)	390.50 (G)
1		160.11 (i)	163.80 (i)	186.03 (i)	187.92 (L)	187.97 (L)	187.98 (L)	157.93 (L)
2		346.38 (G)	345.86 (G)	341.19 (G)	333.19 (G)	323.54 (G)	169.36 (G)	164.26 (G)
3	2nd	428.10 (G)	428.24 (G)	427.95 (G)	427.90 (G)	427.43 (G)	274.03 (G)	229.70 (i)
4		462.40 (G)	462.66 (G)	458.64 (G)	447.65 (G)	430.58 (G)	409.93 (G)	206.18 (i)
5		487.60 (G)	487.71 (G)	485.52 (G)	480.01 (G)	471.26 (G)	459.99 (G)	358.25 (i)
1		160.11 (i)	163.80 (i)	186.03 (i)	187.92 (L)	187.97 (L)	187.98 (L)	157.93 (L)
2		346.38 (G)	345.86 (G)	341.19 (G)	333.19 (G)	323.54 (G)	312.29 (G)	164.26 (G)
3	3rd	428.10 (G)	428.24 (G)	427.95 (G)	427.90 (G)	427.43 (G)	274.03 (G)	229.70 (G)
4		462.40 (G)	462.66 (G)	458.64 (G)	447.65 (G)	430.58 (G)	409.93 (G)	206.18 (G)
5		487.60 (G)	487.83 (G)	485.52 (G)	480.01 (G)	471.26 (G)	459.99 (G)	358.25 (G)

G : Global buckling L : Local buckling i : Interaction

3. 초기불완전성을 고려한 사인형 주름 강판의 전단 좌굴

3.1 주름 강판 두께(t)에 따른 비교

형상에 대한 초기 불완전성을 고려한 사인형 주름 강판의 결과와 양상을 <Table 4>와 <Fig. 4>에 나타내었다. t=1mm의 경우, 1~3차 모드에서 모두 연성 좌굴의 패턴이 발생하였다. 초기에 연성좌굴이 발생하는 경우, 불완전성이 증가할수록 전단 좌굴응력(τ_{cr})이 증가하는 경향을 보였으며, 연성좌굴에서 국부좌굴로 좌굴 패턴이 바뀌는 모습을 볼 수 있었다. $t \neq 1$mm에서는 모두 전체좌굴이 발생하였으며, 두께가 증가할수록 전단 좌굴응력(τ_{cr})이 증가하였다. 이를 통해 두께가 얇을 1mm에서는 국부좌굴과 연성좌굴 패턴이 발생하며, $t \geq 2$mm에서는 전체좌굴이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한, 두께가 증가할수록 전단 좌굴응력의 증가 폭이 작아진다는 것을 알 수 있었다. 5.0%의 초기 불완전성을 가진 경우, t=3mm를 제외한 모든 두께에서 모드 1의 전단 좌굴응력이 모드 2, 3보다 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 초기불완전성(Imperfection)의 영향

연성좌굴이 발생하는 t=1mm에서는 초기 불완전성이 1.5%까지 좌굴응력(τ_{cr})이 증가하는 모습을 보이다가 1.5%를 초과하게 되면 좌굴응력(τ_{cr})이 감소하는 모습을 나타내고 있다. 또한, 초기 불완전성이 1.5%를 초과하는 경우, 좌굴응력(τ_{cr})을 예측하기 어렵다. 일부 두께에서 1.5%를 기점으로 급격하게 떨어지는 결과를 나타내었다. $t \geq 2$mm에서는 초기 불완전성이 증가할수록 좌굴응력(τ_{cr})이 감소하는 경향을 보이며, 이 중 t=3mm에서 초기 불완전성에 대한 좌굴응력 감소가 67%로 가장 크게 나타났다. $t \geq 3$mm에서는 초기 불완전성의 증가에 따른 전단 좌굴응력의 감소 폭이 점점 작아지며, 모드 1의 좌굴응력이 모드 2, 3보다 크기 때문에 전단좌굴에 더 유리하다는 것을 알 수 있으며, 이 경우에는 모드 2, 3에 맞게 설계할 필요가 있다.

〈Table 5〉 Results of Eigenvalue Buckling Analysis (Trapezoidal model)

Impf / t(=mm)	Mode	0%	0.1%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	5.0%
1		150.48 (i)	156.49 (i)	175.94 (i)	188.68 (L)	185.89 (L)	185.21 (L)	145.66 (L)
2		287.05 (G)	284.97 (G)	262.13 (G)	217.76 (G)	173.23 (G)	137.59 (G)	153.78 (G)
3	1st	341.90 (G)	341.46 (G)	332.29 (G)	335.78 (G)	317.55 (G)	293.44 (G)	156.29 (G)
4		366.28 (G)	366.42 (G)	366.91 (G)	366.37 (G)	362.26 (G)	349.28 (G)	206.98 (G)
5		388.50 (G)	388.65 (G)	388.09 (G)	392.30 (G)	395.32 (G)	396.76 (G)	330.89 (G)
1		150.48 (L)	154.38 (i)	166.80 (i)	186.7 (L)	186.79 (L)	186.85 (L)	172.51 (L)
2		287.05 (G)	286.73 (G)	282.62 (G)	274.82 (G)	264.86 (G)	252.55 (G)	89.85 (G)
3	2nd	341.90 (G)	342.23 (G)	342.81 (G)	306.62 (G)	274.01 (G)	243.45 (G)	104.38 (G)
4		366.28 (G)	365.92 (G)	363.60 (G)	356.58 (G)	362.28 (G)	333.25 (G)	196.92 (G)
5		388.50 (G)	388.74 (G)	387.69 (G)	385.98 (G)	383.39 (G)	380.02 (G)	310.53 (G)
1		150.48 (i)	154.38 (i)	166.80 (i)	186.70 (L)	186.79 (L)	186.85 (L)	172.51 (L)
2		287.05 (G)	286.73 (G)	282.62 (G)	274.82 (G)	264.86 (G)	252.55 (G)	89.85 (G)
3	3rd	341.90 (G)	342.23 (G)	342.81 (G)	306.62 (G)	274.01 (G)	243.45 (G)	104.38 (G)
4		366.28 (G)	365.92 (G)	363.60 (G)	356.58 (G)	346.22 (G)	333.25 (G)	196.92 (G)
5		388.50 (G)	388.74 (G)	387.69 (G)	385.98 (G)	383.39 (G)	380.02 (G)	310.53 (G)

G : Global buckling L : Local buckling i : Interaction

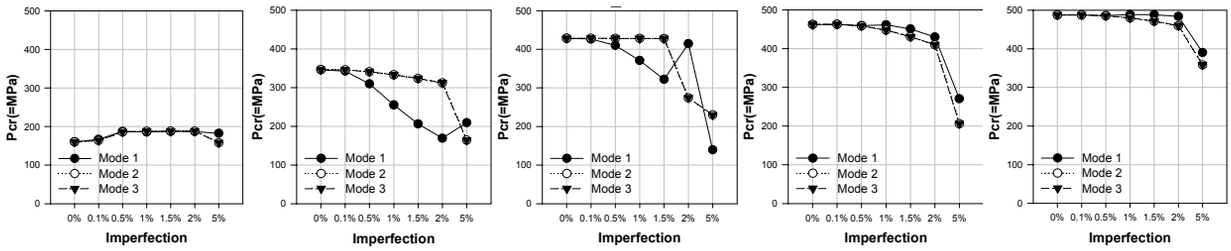
4. 초기 불완전성을 고려한 제형 주름 강판의 전단좌굴

4.1 주름 강판 두께(t)에 따른 비교

초기 불완전성을 고려한 제형 주름 강판의 전단좌굴 해석 결과와 그에 따른 양상을 〈Table 5〉와 〈Fig. 5〉에 나타내었다. t=1mm의 경우, 사인형 주름 강판과 같이 연성 좌굴이 발생하는 모습을 보였으며, 초기 불완전성이 증가함에 따라 연성좌굴에서 국부좌굴로 패턴이 바뀌었다. 이를 통해 t=1mm에서는 연성좌굴과 국부좌굴이 발생하기 쉬우며, $t \geq 2$mm에서는 좌굴 패턴이 모두 전체좌굴이라는 것과, 두께가 증가할수록 좌굴응력 증가 폭이 작아진다는 것을 알 수 있다. 초기에 연성 좌굴이 발생하는 경우, 사인형 주름 강판과 마찬가지로 초기불완전성이 증가할수록 좌굴응력이 증가하는 경향을 보인다. 이를 통해 t=1mm를 기준으로 초기 불완전성에 대한 좌굴 형상이 다르다는 것을 알 수 있었다.

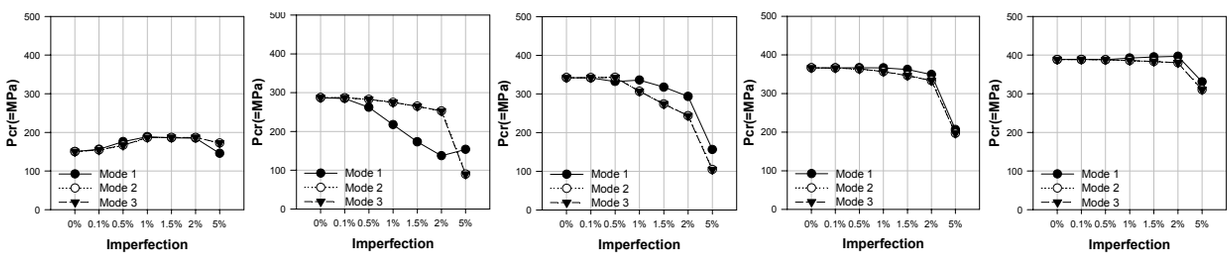
4.2 초기불완전성(Imperfection)의 영향

t=1mm의 경우, 연성좌굴의 좌굴 패턴이 발생하며, 초기 불완전성이 1.5% 이하에서는 전단 좌굴응력이 감소하는 경향이 있지만, 1.5% 이상에서는 이를 예측하기가 어렵다. 초기에 연성좌굴이 발생하는 경우 불완전성이 증가함에 따라 연성좌굴에서 국부좌굴로 좌굴 패턴이 바뀌는 경향이 있다. t=1mm를 제외하고 모든 두께에서는 불완전성의 증가에 따라 좌굴응력이 감소하는 결과를 얻었다. 해석결과에서 사인형의 경우가 제형보다 전단좌굴에 대해서는 더 안정되나 초기 불완전성의 영향은 유사하다고 볼 수 있다. 이것은 사인형과 비교하였을 때, 제형 강판이 모든 두께에서 전단 좌굴응력이 낮다는 것을 통해 알 수 있다.



(a) t=1mm (b) t=2mm (c) t=3mm (d) t=4mm (e) t=5mm

〈Fig. 5〉 Buckling stress of Sinusoidal Steel Plate



(a) t=1mm (b) t=2mm (c) t=3mm (d) t=4mm (e) t=5mm

〈Fig. 6〉 Buckling stress of Trapezoidal Steel Plate

5. 결론

본 연구는 사인형 및 제형 주름 강판에 대한 초기 불완전성을 고려하여 전단좌굴 특성을 비교하였으며, 비교결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 사인형 주름 강판의 경우 형상에 대한 초기불완전성이 1.5% 이하에서 전단 좌굴응력이 감소하는 경향이 보인다. 그러나 완전한 형상의 모델에서 연성좌굴이나 국부좌굴이 나타난 t=1mm의 경우는 감소하지 않았다.
2. 사인형 및 제형 주름 강판 모두 두 번째와 세 번째 모드가 같은 결과를 보였고, 두께가 증가할수록 첫 번째 모드의 전단 좌굴응력 차이가 감소하는 경향을 보였다.
3. 파장 길이가 같은 두 주름강판을 비교하였을 때, 사인형 주름 강판의 좌굴응력이 최대 20% 크게 나타났다. 또한, 두께의 증가는 사인형의 경우가 제형 주름 강판 대비 좌굴응력이 더 증가하기 때문에 사인형 주름 강판이 전단좌굴에 있어 더 유리한 것으로 판단된다.
4. 두께가 얇은 모델에서 연성좌굴모드가 초기불완전형상으로 고려된 경우, 불완전량이 증가할수록 전단 좌굴응력이 다소 증가하며, 불완전량 1.5%이상의 모델에서 좌굴응력이 감소하였다.

본 연구에서는 전단좌굴응력의 계산을 선형좌굴해석을 통해서 구하였고, 그 결과 위와 같은 결과를 도출할 수 있었다. 그러나 좌굴에 대한 임계 레벨에 대한 평가를 정확히 계산하기 위해서는 비선형 해석을 수행할 필요가 있으며, 이러한 과정에 관한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2019R1A2C2010693). 또한 본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21 FOUR 사업의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. Shon, S.D., Yoo, M.N., Kang, J.W. & Lee, S.J., “Minimum Weight Design of Sinusoidal Corrugated Web using Differential Evolution Algorithm,” International Journal of Steel Structures, Vol.15, No.1, pp.213-225, 2015.
2. Shon, S.D., Yoo, M.N. & Lee, S.J., “An

Experimental Study on the Shear Hysteresis and Energy Dissipation of the Steel Frame with a Trapezoidal-Corrugated Steel Plate," Materials, Vol.10, No.3, 2017.
3. Pasternak, H. & Kubieniec, G., "Plate girders with corrugated webs," Journal of Civil Engineering and Management, Vol.16, No.2, pp.166~171, 2010.
4. Abbas, H.H., Sause, R., & Driver, R., "Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders," Proceedings Structural Stability Research Council, pp.361~387, 2002.
5. Shon, S.D. & Lee, S.J., "Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-valued Genetic Algorithm," Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.23, No.5, pp.581~593, 2011.
6. Shon, S.D, Yoo, M.N. & Lee, S.J, "Characteristics of Cross-section of Sinusoidal Corrugated Web Girder in Accordance with Minimum Weight Design," Journal of the Architectural Institute of Korea Structures & Construction, Vol.28, No.10, pp.73~80, 2012.
7. Fereshteh, E., Massood, M. & Abolhassan V, "Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls," Journal of Engineering Structures, Vol.48, pp.750~762, 2013.
8. Laszlo, G.V., Abbie, B.L., Gregory G.D., Eduardo M., & Steven,T., "Component model calibration for cyclic behavior of a corrugated shear wall," Journal of Thin-Wall structures, Vol.75, pp.53~62. 2014.
9. Yoo, M.N., "Evaluation of the Seismic Performance of Steel Structural Using Corrugated Steel Plates," Koreatech Universtity of Technology and Education, PhD Dissertation, 2016.
10. Anamia, K., Sause, R., & Abbas, H.H., "Fatigue of web-flange weld of corrugated web girders: 1. Influence of web corrugation geometry and flange geometry on web-flange weld toe stresses, International Journal of Fatigue, Vol.27, No.4, pp.373~381, 2005.
11. Abbas, H.H., Sause, R., & Driver, R., "Analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane loads," Journal of Structural Engineering, Vol.133, No.3, pp.347~355, 2007.
12. Abbas, H.H., Sause, R. & Driver, R., "Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane moment and shear", Journal of Engineering Structures, Vol.29, pp.2816~2824, 2007.
13. Yi, J. W., Gil, H.B., Youm, K.S. & Lee, H.E., "Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs," Engineering Structures, Vol.30, pp.1659~1666, 2008.
14. Ibrahim, S.A., "Lateral torsional buckling strength of unsymmetrical plate girders with corrugated webs," Engineering Structure, Vol.81, pp.123~134, 2014.
15. Han, T.H., Lim, N.H., Park, N.H. & Kang, Y. J., "Elastic Shear Buckling Characterstics of Circularly Corrugated Plates," Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.14, No.4, pp.529~539, 2002.
16. Shon, S.D., Yoo, M.N., Lee, S.J. & Kang, J.W., "A comparative study on shear buckling and interactive buckling characteristics of trapezoidal and sinusoidal corrugated steel plate," Journal of the Architectural Institute of Korea Structures & Construction, Vol.31, No.4, pp.39~46, 2015.
17. Song, J., Yu, Y. & Zhang, S., "Initial Imperfection Simulation and Effect on Shear Buckling of Corrugated Steel Webs," Advanced Materials Research, Vols.308-310, pp.2463-2470, 2011.

■ Received : September 10, 2021
■ Revised : September 30, 2021
■ Accepted : September 30, 2021