

절곡강판을 적용한 강박스거더 압축플랜지의 탄성좌굴 및 극한 거동

김도형¹ · 이성철^{2*}

¹박사과정, 동국대학교, 건설환경공학과, ²교수, 동국대학교, 건설환경공학과

Elastic Buckling and Ultimate Strength Behaviors of Steel Box Girders with Folded Compression Flanges

Kim, Dohyeong¹, Lee, Sung Chul^{2*}

¹Ph.D. student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul, 04620, Korea

²Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul, 04620, Korea

Abstract - Wide compression flanges used in steel box girders are often stiffened with longitudinal stiffeners and sometimes in conjunction with transverse stiffeners, to increase local buckling strength. In a few design codes, longitudinal stiffeners are designed to provide continuous support during elastic buckling. The subpanels divided by the stiffeners are treated as independently supported plates, and the support condition depends on the rigidity of the stiffeners. This study introduces a new type of compression flange that is not stiffened with the longitudinal stiffeners and is instead folded longitudinally along the stiffener lines. The subpanels divided by folding provide simple support to each other if folded with a proper angle. The folded flange could be a cost-effective alternative to stiffened wide flanges.

Keywords - Folded steel plate, Folding angle, Local buckling, Longitudinal stiffener, Steel box girder, Stiffened compression flange

1. 서론

강박스거더의 하부플랜지가 압축을 받는 경우 좌굴강도 증가를 위해 종방향 및 횡방향 보강재를 설치한다. 보강된 압축 플랜지의 설계방법은 (1) 스트럿(strut) 접근법과 (2) 서브 패널(subpanel) 접근법으로 나뉜다. 유럽에서 전통적으로 적용하는 스트럿 접근법은 Fig. 1.과 같이 보강된 압축플랜지를 플랜지 유효폭과 보강재로 구성된 각각의 스트럿으로 나누어 강도를 구한 후, 각각의 스트럿 강도를 더하여 전체 보강플랜지의 극한강도를 구한다^[1]. 미국 AASHTO 설계기준^[2] 및 도로교 설계기준^[3]에서 사용되는 서브 패널 접근법은 Fig. 2.와 같이 보강재로 구분되는

서브 패널을 독립적으로 지지된 판으로 가정한다. 이 때, 서브 패널의 경계조건은 보강재의 강성에 좌우되며, 일반적으로 단순지지 조건을 만족하도록 보강재를 설계한다.

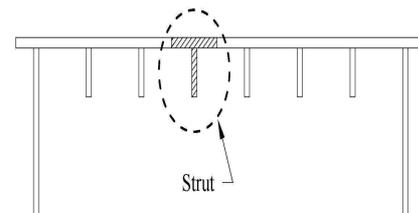


Fig. 1. Strut approach

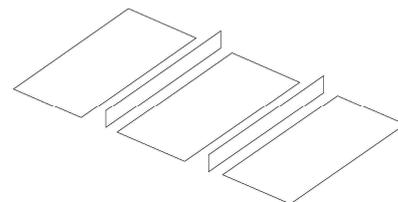


Fig. 2. Sub-panel approach

Note.-Discussion open until February 28, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 23, 2018; revised July 30, 2018; approved on August 2, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2260-3354 Fax. +82-2-2266-8737

E-mail. sclee@dongguk.edu

한편 Fig. 3.과 같은 다근 형강(channel section)으로 기둥 또는 보를 설계하는 경우, 각각의 판 요소의 국부 좌굴강도를 결정해야한다. AISI 설계 기준^[4] 및 강구조설계기준^[5]에서는 요소의 국부좌굴 강도가 판의 항복강도를 초과하도록 하는 판의 폭-두께 비를 다음 식과 같이 보강 및 비보강 요소로 나누어 제시한다.

$$b/t \leq 0.56 \sqrt{E/F_y} \quad (1)$$

$$h/t_w \leq 1.49 \sqrt{E/F_y} \quad (2)$$

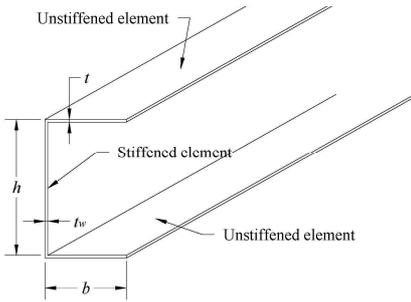


Fig. 3. Channel section

위의 두 식은 보강 요소(stiffened element) 및 비보강 요소(unstiffened element)가 요소간 경계를 따라 단순지지 된다고 가정하여 얻어진 식이다. 즉 국부좌굴이 발생하더라도 연결부가 직선을 유지한다는 의미이다. 이는 보강 및 비보강 요소가 서로에게 단순지지 조건을 제공함을 뜻한다. 보통의 다근 형강은 보강 및 비보강 요소가 서로 직교한다. Fig. 4.의 절곡 강판과 같이 보강 및 비보강 요소의 연결부가 90° 보다 작은 각도를 갖는다면, 경계조건은 단순지지조건을 만족하지 않을 수 있다.

Fig. 5.와 같은 절곡강판에서 단순지지 조건을 만족하는 절곡 각도를 결정할 수 있다면, 보강 플랜지 대신 Fig. 6.과 같이 절곡 강판을 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 보강플랜지

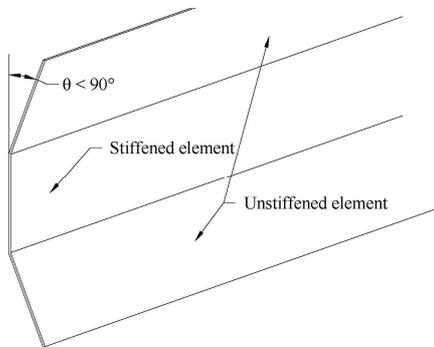
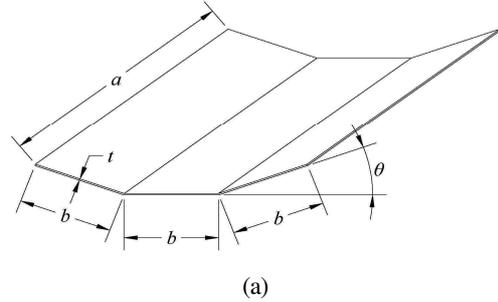
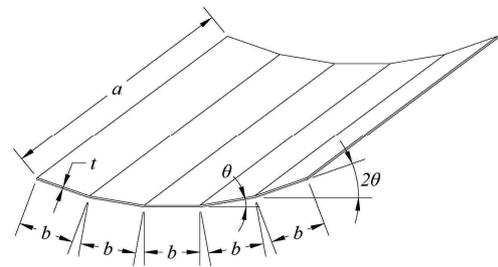


Fig. 4. Folded plate

를 절곡 강판으로 대체한다면 강박스거더의 제작비용을 상당히 절감할 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서는 탄성 좌굴 해석을 통해 Fig. 5.에서 주어진 두 가지 형식의 절곡 강판에 대하여 절곡 각도에 따른 지지조건의 변화를 규명하였고, 비선형 극한해석을 통해 절곡 압축플랜지의 강박스거더 적용성을 검토하였다.

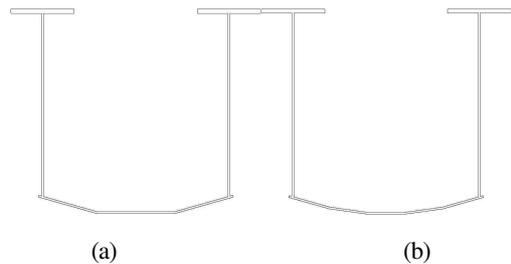


(a)



(b)

Fig. 5. Folded plate models: (a) Model 2F, (b) Model 4F



(a)

(b)

Fig. 6. Steel box girders using folded flange: (a) Model 2F, (b) Model 4F

2. 탄성 좌굴 해석

먼저, 균일한 압축을 받는 절곡 판(모델 2F)의 선형 좌굴해석을 수행하였다(Fig. 7). 절곡판의 경계조건은 4번 단순지지로 하

였다. 본 해석에서 매개변수는 서브 패널의 세장비(b/t)와 절곡 각도(θ)이다.

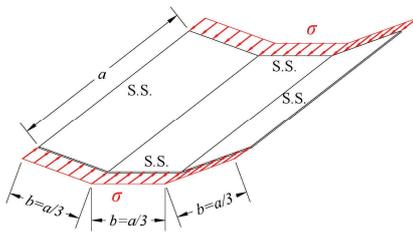


Fig. 7. Folded plate subjected to uniform compression (Model 2F)

본격적인 해석에 앞서 요소망의 밀도를 결정하기 위해 Fig. 8. 과 같이 균일한 압축을 받는 단순지지 직사각형 판($a/b = 3$)에 대한 수렴해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 4 절점 사각 요소(QUAD4)를 사용하였으며^[6], 단순지지 직사각형 판의 좌굴 강도 σ_{cr} 은 식 4과 같다^[7].

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(t/b)^2} \quad (3)$$

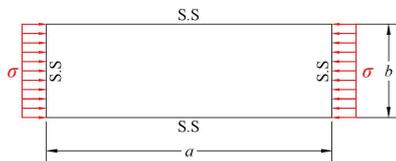


Fig. 8. Simply supported plated

여기에서 t 는 판두께이며 b 는 판의 폭이다. 탄성계수 E 는 200 GPa, 프아송 비 μ 는 0.3을 사용하였다. 판의 형상비 a/b 가 정수일 때 좌굴계수 k 는 4.0이 되고 정수가 아닌 경우 4.0보다 크다. 판의 형상비가 무한대로 커질 경우, 좌굴계수는 4.0으로 수렴한다. 설계 시에는 보수적으로 4.0을 사용한다. 수렴 해석의 결과는 Fig. 9.와 같다. 10×30 요소망을 사용하는 경우 식 219를 통해 계산된 좌굴 하중에 비해 1% 정도 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 절곡판의 서브 패널이 10×30 의 요소망을 갖도록 모델링하였다. 1차 좌굴 모드 형상은 Fig. 10.과 같다.

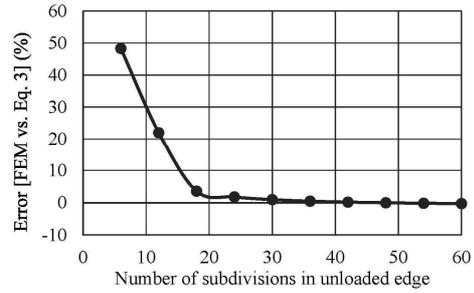


Fig. 9. Result of convergence analysis

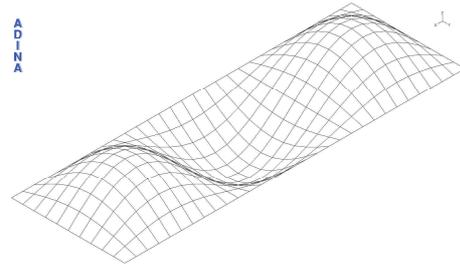


Fig. 10. First buckling mode of 10×30 mesh

절곡부의 절곡반경(R)이 미치는 영향에 대해 서브 패널의 세장비가 50인 경우 $b/t=50$ 인 절곡강판에 대해 절곡반경을 50, 100, 200, 300, 400 및 500 mm로 변경하며 해석을 수행한 결과는 Fig. 11.과 같다. 해석결과에서 보이는 것과 같이 절곡반경이 좌굴거동에 미치는 영향이 미미하여 이후 해석에서는 절곡반경을 0 mm를 갖도록 모델링 하였다.

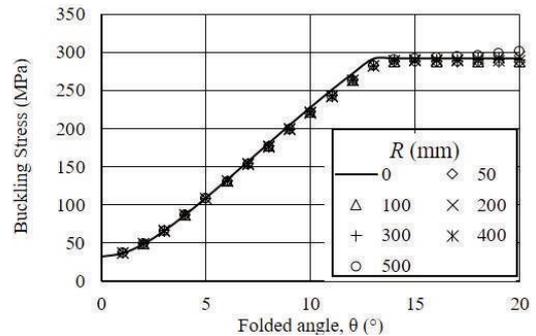


Fig. 11. Effect of bending radius

서브 패널의 세장비가 $b/t=50$ ($b=500$ mm, $t=10$ mm)일 때, 모델 2F의 선형 좌굴 해석 결과 1차 좌굴 모드 형상은 Fig. 12.와 같으며, $\theta \geq 13^\circ$ 인 경우, 좌굴 발생 이후에도 절곡부가 선형을 유지하고, 각각의 서브 패널의 좌굴 형상이 Fig. 10.의 단순지지 된 판과 같은 형상과 유사한 거동을 보였다. 절곡 각도에 따른 좌굴강도는 Fig. 13.과 같다. 절곡 각도 θ 가 증가함에 따라,

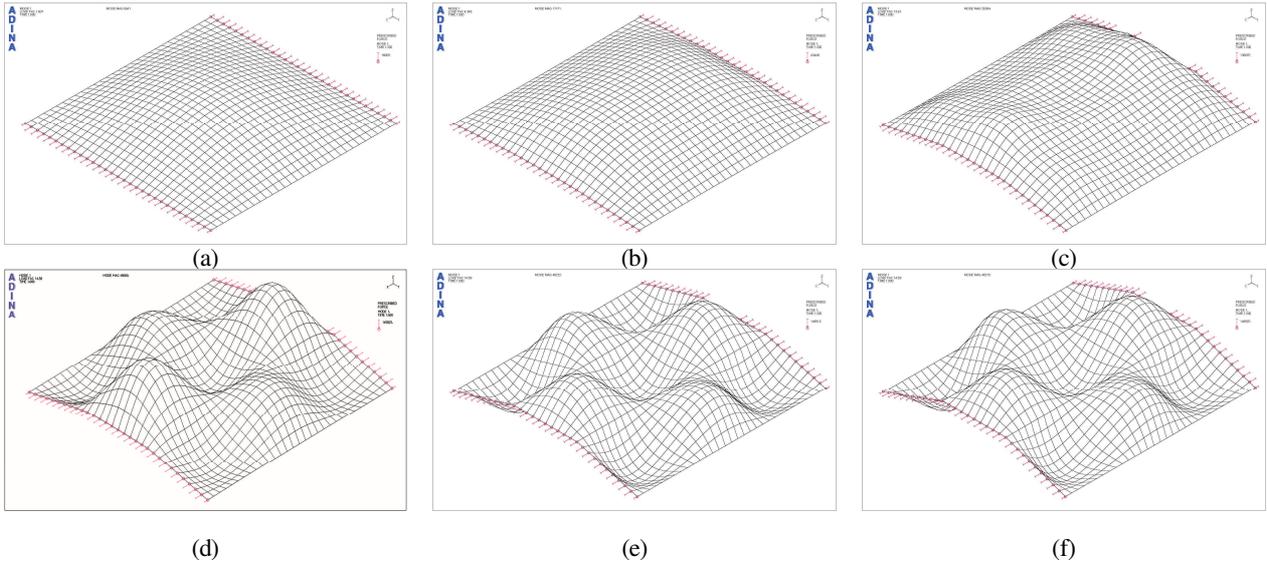


Fig. 13. First buckling modes of Model 2F (b/t=50): (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=4^\circ$, (c) $\theta=12^\circ$, (d) $\theta=13^\circ$, (e) $\theta=16^\circ$, (f) $\theta=20^\circ$

좌굴 강도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 θ_s (임계절곡각도, 13°) 이후에는 절곡각도가 증가하더라도, 좌굴 강도가 더 이상 증가하지 않았다. 최대 좌굴 강도는 291.8 MPa로 나타났고, 식 219의 역산을 통하여 서브 패널의 좌굴계수를 구하면 단순지지 판 좌굴 계수인 4.0이 된다. 다양한 세장비를 갖는 모델 2F의 절곡각도에 따른 좌굴강도는 Fig. 15.에 주어졌다. 세장비별 절곡각도에 따른 좌굴강도 중 수렴하는 최댓값을 역산하면 서브 패널의 좌굴 계수가 4.0이 된다. 이를 통해 절곡각도(θ)가 임계절곡각도(θ_s)보다 큰 경우 모델 2F의 서브 패널들이 각각 서로 단순지지 경계 조건을 제공함을 알 수 있고, 세장비가 증가할수록 임계절곡각도 θ_s 가 감소함을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 5.(b)와 같은 형상의 4번 절곡된 판(모델 4F)의 임계절곡각도를 구하기 위해 모델 2F와 같은 방법으로 해석하였다. 서브 패널의 형상비(a/b)는 5이다($a=1,500$ mm, $b=300$ mm). 해석 결과는 Fig. 16.에 주어져 있다. 서브 패널의 세장비

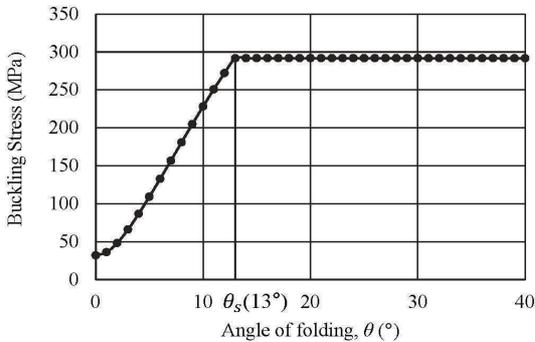


Fig. 12. Buckling stress of Model 2F (b/t=50)

가 같은 경우, 모델 2F와 4F의 임계절곡각도가 매우 유사하게 나타났다. 세장비가 50인 경우의 절곡 각도에 따른 1차 좌굴 모드 형상은 Fig. 17.과 같다. 임계절곡각도 이상의 절곡각도를 갖는 판의 서브 패널은 Fig. 14.의 단순지지 판의 좌굴형상과 유사한 형상으로 좌굴이 발생함을 알 수 있다.

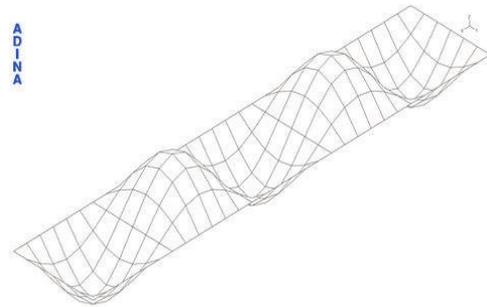


Fig. 14. Buckling mode of simply supported plate (a/b=5, b/t=50)

3. 절곡 강판을 적용한 강박스거더의 극한 거동

3.1 강박스거더의 형상 및 재료 물성치

좌굴 해석 결과의 검증과 절곡 강판의 강박스거더에의 적용성을 평가하기 위해 절곡 압축 플랜지를 갖는 4개의 개구형 강박스

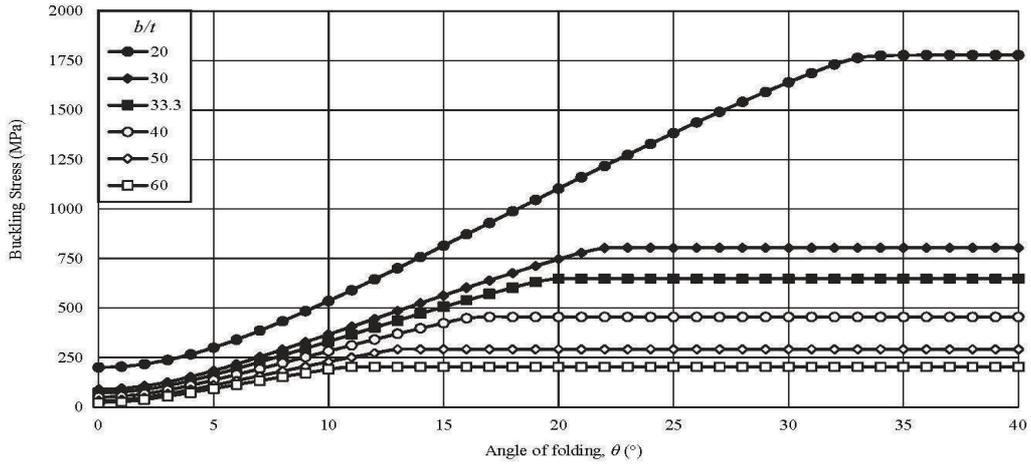


Fig. 15. Buckling stresses of Model 2F

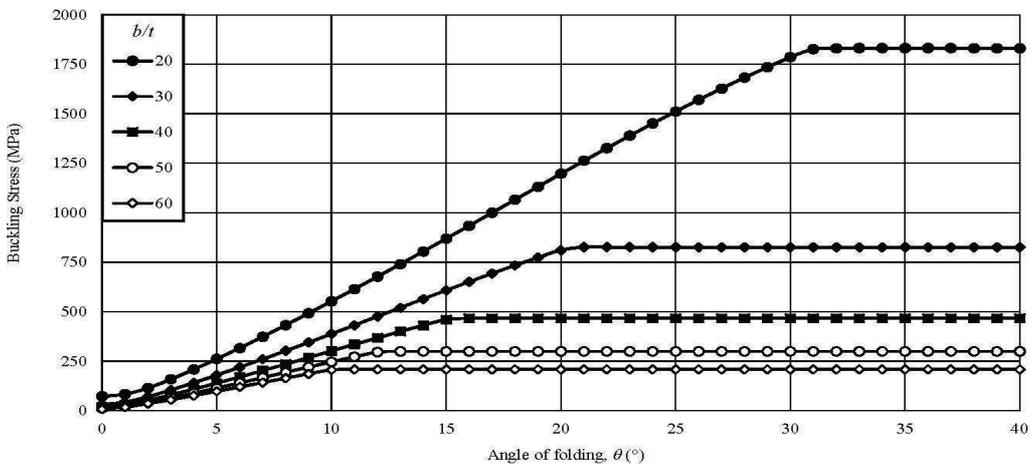


Fig. 16. Buckling stresses of Model 4F

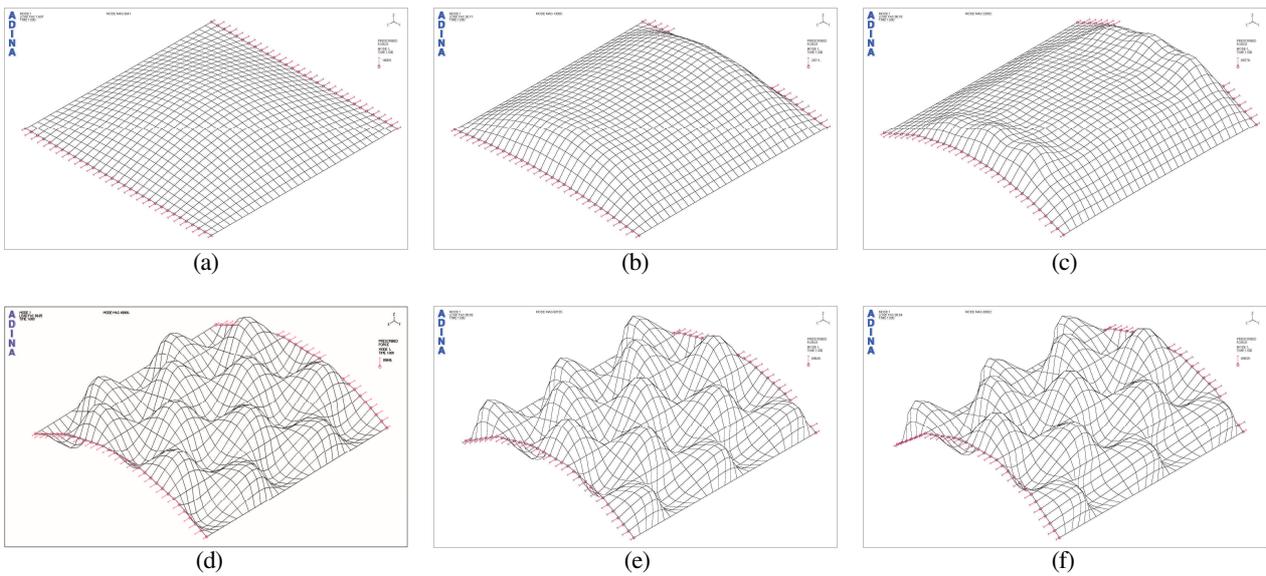


Fig. 17. First buckling modes of Model 2F ($b/t=50$): (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=4^\circ$, (c) $\theta=12^\circ$, (d) $\theta=13^\circ$, (e) $\theta=16^\circ$, (f) $\theta=20^\circ$

절곡강판을 적용한 강박스거더 압축플랜지의 탄성좌굴 및 극한 거동

거더에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 18.과 같이 중앙패널 (tested panel)에 균일한 압축응력이 발생하도록 하중은 4점 하 하였고, 절곡 플랜지가 위를 향하도록 실험체를 거치하였다 (Fig. 19.). 압축플랜지가 항복하기 전에 전단 및/또는 휨 응력에 의해 복부판이 먼저 좌굴이 발생하여 파괴되는 현상을 방지하기 위해 수직/수평 보강재를 충분히 배치하였다. 인장 플랜지에는 브레이싱을 배치하였으며, 하중 재하부와 지점부에 다이아프램을 설치하였다.

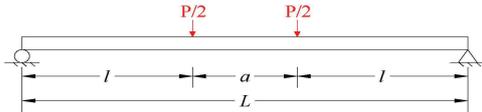


Fig. 18. 4-point loading condition

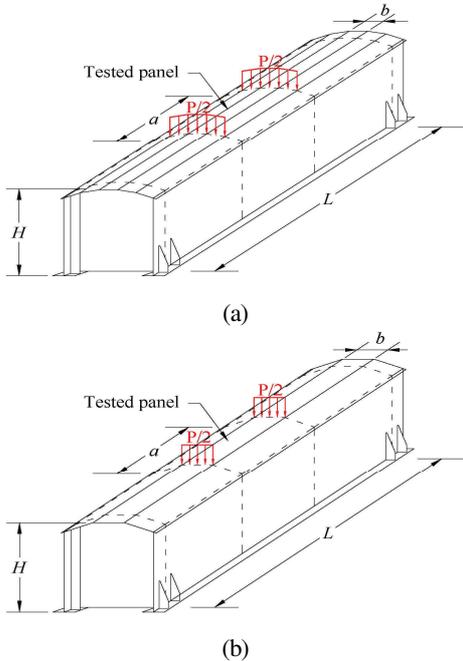
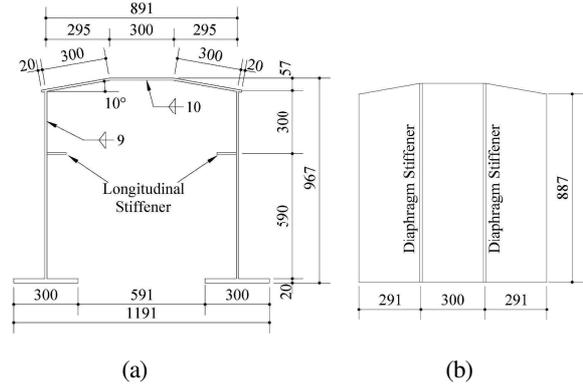


Fig. 19. Placement of box girders: Box girder with (a) Model 2F, (b) Model 4F

모델 2F-A와 2F-B는 모두 2번 절곡한 플랜지를 적용하였으며, 단면형상은 Fig. 20.과 같다. 항복강도 F_y 는 315 MPa로 하였다. 서브 패널의 세장비는 30이고, 절곡각도는 10° 이며, 이때의 절곡 압축 플랜지의 좌굴강도는 366 MPa(Fig. 15.)로 강재의 항복강도를 초과하도록 설계하였다. 따라서 중앙 패널이 항복에 도달하기 전에 중앙부 서브패널에서 국부좌굴이 발생하지 않을 것으로 예상된다. 해석 모델 제원은 Table 1에 주어져 있다.



(a) (b)

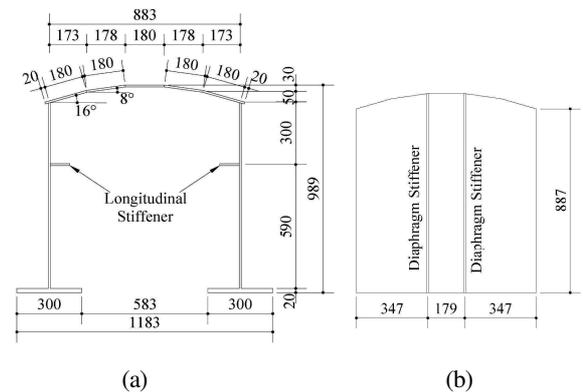
Fig. 20. Model 2F-A and 2F-B:

(a) Cross section at the center of girder, (b) Diaphragm

Table 1. Geometries of models

Model	2F-A	2F-B	4F-A	4F-B
b/t	30	20		
a/b	3	9	5	15
b (mm)	300	180		
L (mm)	4,500	6,300	4,500	6,300
H (mm)	968		989	
θ ($^\circ$)	10		8	
t (mm)	top flange	10		9
	bottom flange	20		20
	web	9		9

모델 4F-A와 4F-B는 Fig. 21.과 같이 4번 절곡한 플랜지를 갖는다. 물성치는 모델 2F-A 및 2F-B와 동일하고, 일정한 휨모멘트구간의 검토 서브 패널의 형상비는 모델 4F-A와 4F-B 각각 5, 15이다. 서브 패널의 세장비는 20이고 절곡 각도는 8° 이다. Fig. 15.에서 확인해 보면 좌굴 강도(432 MPa)가 강재 항복 강도를 초과함을 알 수 있다.



(a) (b)

Fig. 21. Model 4F-A and 4F-B:

(a) Cross section at the center of girder, (b) Diaphragm

3.2 유한요소해석 모델링 및 비선형 유한요소해석

재료 및 기하학적 비선형 해석을 통해 4개의 강박스거더에 대한 극한 거동을 검토하였다. Fig. 22.와 같은 응력-변형도 관계를 갖는 재료를 사용하였다. 강판의 모델링에는 QUAD4 요소^[6]가 사용되었다. 모델 2F-A의 유한요소망은 Fig. 23.과 같다. ADINA 프로그램에서 소성 재료 모델은 폰 미세스 항복 조건 (von Mises yield criterion)을 따른다.

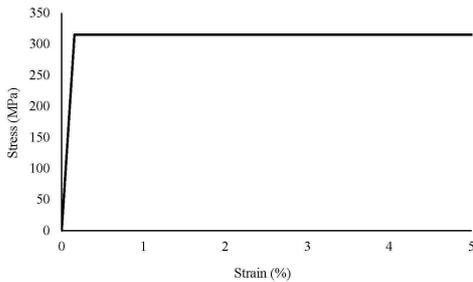


Fig. 22. Bilinear stress-strain relation

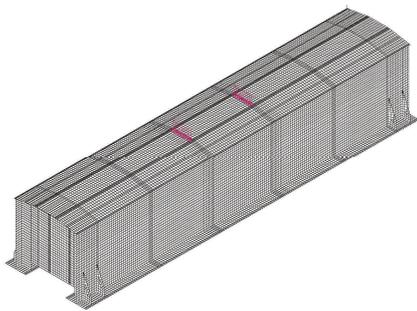


Fig. 23. Finite element mesh of Model 2F-A

3.3 비선형 유한요소해석 결과

Fig. 24.는 모델 2F-A와 2F-B의 하중-변위 곡선이다. 여기에서 P_y 는 중앙부 서브 패널의 최대 압축응력이 항복응력에 도달할 때의 하중이다. 모델 2F-A와 2F-B 모두 압축플랜지의 국부좌굴에 의한 이른 파괴 없이 P_y 에 도달하였다. Fig. 25.의 검은색 영역은 모델 2F-A가 극한 하중에 도달하였을 때의 항복영역을 나타낸다. 모델 4F-A와 4F-B 또한 Fig. 26.과 같이 2번 절곡 플랜지를 적용한 결과와 유사한 결과를 보였다.

본 연구에서 제시된 절곡 각도에 따른 절곡 압축플랜지의 좌굴 강도 곡선을 이용하여 설계된 강박스거더에 대한 비선형 극한해석을 수행한 결과 플랜지가 항복에 도달하기 전에 국부좌굴이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 통해 제시된 절곡 각도에 따른

절곡 압축플랜지 좌굴강도 곡선의 타당성을 검토하였으며, 강박스거더 압축플랜지에 보강재를 배치하지 않고 절곡만으로 충분한 강도를 발현할 수 있음을 보였다.

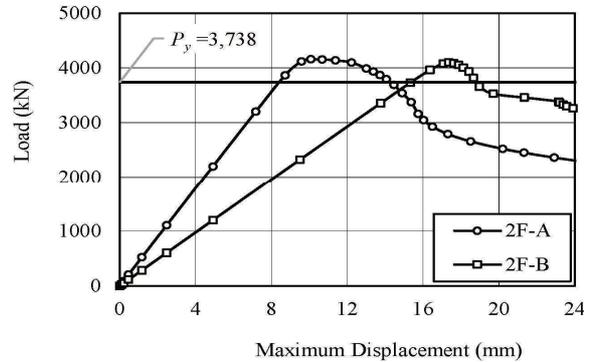


Fig. 24. Load vs. maximum displacement curves (Models 2F-A and 2F-B)

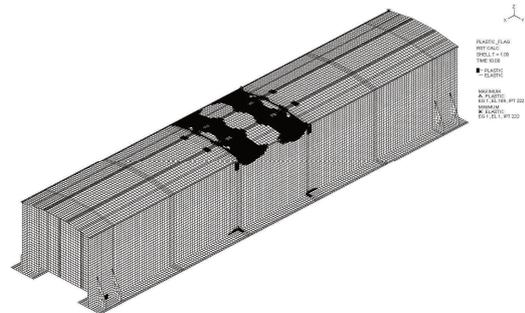


Fig. 25. Yield zones at ultimate load (Model 2F-A)

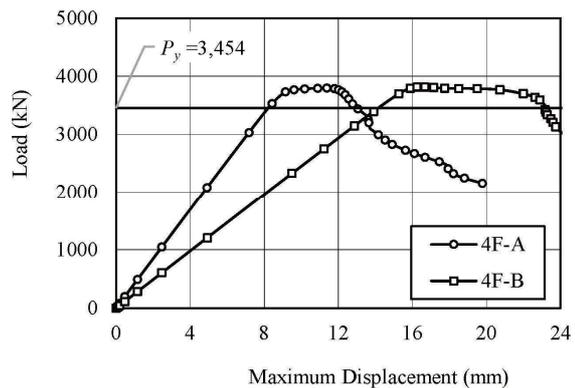


Fig. 26. Load vs. maximum displacement curves (Models 4F-A and 4F-B)

4. 결 론

본 연구는 종방향 보강재로 보강하는 대신 보강재 위치를 따라 종방향으로 판을 절곡하는 새로운 형식의 강박스거더 압축플랜지를 개발하였고, 다음과 같은 두 종류의 절곡 플랜지에 대한 성능을 검토하였다: (1) 2번 절곡한 플랜지; (2) 4번 절곡한 플랜지.

절곡 각도의 증가에 따라 좌굴 강도가 증가함을 알 수 있었다. 그러나 임계절곡각도 이상 절곡하는 경우 좌굴 강도가 더 이상 증가하지 않았다. 절곡각도가 임계절곡각도를 초과하는 경우 서브패널이 서로 단순지지 경계조건을 제공하는 것으로 보인다. 선형좌굴해석 결과를 통해 2번 절곡 및 4번 절곡한 플랜지의 좌굴 강도를 결정하는 설계곡선을 제시하였다.

절곡 압축플랜지를 갖는 4개의 강박스거더를 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 모델은 본 연구에서 개발된 설계곡선을 이용하여 중앙부 서브패널에서 국부좌굴 발생 전에 항복응력에 도달할 수 있도록 설계되었다. 해석결과 중앙부 서브패널의 좌굴 발생 없이 압축에 의한 항복에 도달하였다. 이를 통해, 좌굴해석을 통해 제시된 설계곡선을 검증하였으며, 절곡 강판을 강박스거더에 적용하기에 타당하다고 판단된다. 따라서 압축플랜지 설계시, 보강재를 배치하는 대신 절곡 플랜지를 적용하여 보다 경제적인 거더를 제작가능할 것으로 보인다.

추후 유한요소해석 연구 결과를 검증하고 절곡 플랜지를 강박스거더 건설에 적용하기 위해서 실험을 통한 추가 연구가 필요하

다고 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] Structural Stability Research Council (1998) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* (5th Ed.), Wiley, USA.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (2014) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (7th Ed.), USA.
- [3] 국토교통부(2016) 도로교설계기준(한계상태설계법). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea (in Korean).
- [4] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*, USA.
- [5] 한국강구조학회(2014) 강구조설계기준, 국토교통부. KSSC (2014) *Steel Structure Design Code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- [6] ADINA R&D, Inc. (2016) *ADINA Theory and Modeling Guide, Volume 1: Solids & Structures*, ADINA R&D Inc., USA.
- [7] Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (2012) *Theory of Elastic Stability*, Dover Publications, USA.

요 약 : 강박스거더의 압축플랜지는 국부좌굴강도 증기를 위해 종방향 보강재가 설치된다. 종방향 보강재는 탄성좌굴이 발생할 때, 압축 플랜지에 연속적인 지지조건을 제공하도록 설계된다. 보강재로 나누어진 서브패널은 독립적으로 지지된 판으로 가정하며, 이때 서브패널의 경계조건은 보강재의 강성에 좌우된다. 본 연구에서는 압축플랜지에 종방향 보강재를 설치하는 대신 보강재 위치를 따라 종방향으로 판을 절곡하는 새로운 개념의 압축플랜지를 선형 좌굴해석 및 비선형 극한해석을 통해 검토하였다. 절곡을 통해 나누어진 서브패널은 적절한 각도 이상 절곡하는 경우 서로 단순지지조건을 제공한다. 본 연구에서 개발된 절곡 플랜지는 기존 보강 플랜지에 비해 경제적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 절곡 강판, 절곡 각도, 국부 좌굴, 종방향 보강재, 강박스 거더, 보강 압축 플랜지
