U리브 보강판의 압축좌굴모드 변동특성에 관한 해석적 연구

최수영*, 최병호*
*국립 한밭대학교 토목공학과
e-mail:md301052@hanbat.ac.kr

Buckling behavior of longitudinally stiffened steel plates by U-shaped ribs

Su-Young Choi*, Byung-Ho Choi*
*Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University

요 약

압축을 받는 판 구조의 경제적인 단면 보강을 위해 종방향 보강재인 U형 단면 리브를 적용하는 것이 효과적이나, 현재 국내에서는 명확한 설계지침이나 연구자료가 제시되지 못하고 있다. 따라서 U리브의 적정 크기 및 최적 간격에 대해 검토 후 이에 관한 지침이 제시될 필요성이 있다. 이에, 본 연구에서는 U리브의 단면 크기 및 강성에 따른 탄성좌굴강도 및 좌굴모드의 변화를 알아보고자 한다. 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 고유치 해석을 실시하였고, 이론값과 해석적 결과의 탄성좌굴강도를 비교하였다. 이러한 분석 결과를 토대로 향후 U리브의 최소소요강성 및 단면 선정방안을 제시하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

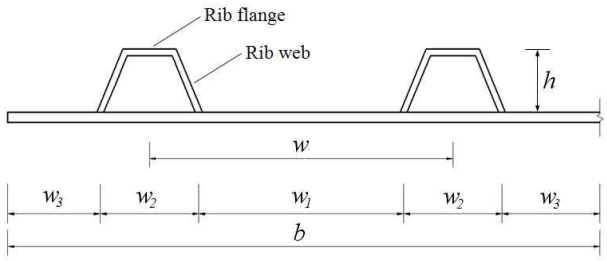
1. 서 론

U형 단면 리브(이하 U리브)는 압축을 받는 판구조의 경제적인 단면 보강을 위해 특히 서구 유럽지역에서 많이 주목받고 있다. 국내에서는 현재 이에 관한 명확한 설계지침이나 충분한 연구자료가 제시되고 있지 못하고 있어, U리브는 주로 강바닥판 등에만 국한되어 적용되고 있으며 매우 조밀한 간격으로 배치되어 활용되고 있다. U리브를 적용한 압축을 판 부재를 보다 합리적으로 설계하기 위해서 U리브 적정 크기 및 이에 따른 최적 간격에 대해 면밀히 검토한 후 이에 관한 지침이 제시될 필요성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 U리브 크기에 따른 보강된 판의 압축좌굴거동 및 탄성좌굴강도에 대해 수치해석적 변수연구를 실시하였다. 이러한 변수연구를 통해, 종방향 보강재로써 U리브를 적용한 압축을 받는 판 부재의 U리브 단면 크기 및 강성에 따른 탄성좌굴 강도 및 좌굴 모드의 변화를 알아보는데 본 연구의 주 목적이 있다. 이러한 분석 결과를 토대로, 향후 U리브의 최소소요강성 및 단면 선정방안을 명료한 수식체계로써 제시될 수 있을 것으로 기대되며, 이는 예비 설계 단계에서 보강재의 배치 및 단면선정을 용이하게 검토하게 하여 보다 최적화된 설계가 가능해 지는데 크게 이바지 할 것으로 사료된다.

2. 해석 모델 설계

2.1. 단면제원

본 해석적 연구를 위해 선정된 U리브 보강판의 단면제원은 그림 1 및 표 1에 제시된 바와 같다.



[그림 1] U리브 보강판의 단면

[표 1] U리브 보강판의 단면 제원

TYPE	t	t_R	w_3	w_3/t	n	α_e
S	8	3~24	333.3	41.7	2	7.2
M	6	2~13	291.7	48.6	2	8.2
L	8	6~24	252.5	31.6	2	9.5

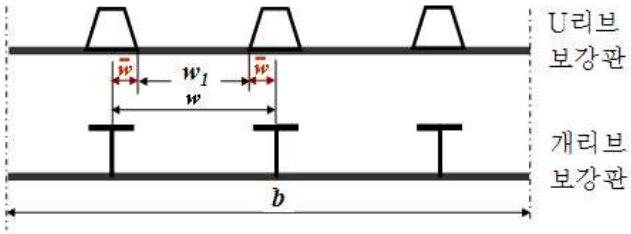
이 때, U리브는 다음과 같이 세 가지 타입으로 고려하여 크기에 따른 영향을 검토해 보고자 한다.

[표 2] U리브의 단면 제원

TYPE	w_2 (mm)	h (mm)	t_limit (mm)
S	100	105	2.5
M	162.4	105	3.7
L	221.6	154	4.8

2.2. 탄성좌굴강도

그림 2에서 보이는 바와 같이 U리브를 적용하면 개단면 리브 적용 단면과 비교할 때, 유효폭이 줄어드는 효과가 있을 것으로 사료된다. U리브 적용 단면은 다음 식과 같은 관계로부터 압축내력(좌굴강도)이 증가하는 효과를 가질 것으로 기대된다.



[그림 2] 단면제원 특성 비교

$$w_1 = w - 2\overline{w}$$

$$Since\ \overline{w} > 0,\ \ \therefore w > w_1 \rightarrow \frac{t}{w} < \frac{t}{w_1}$$

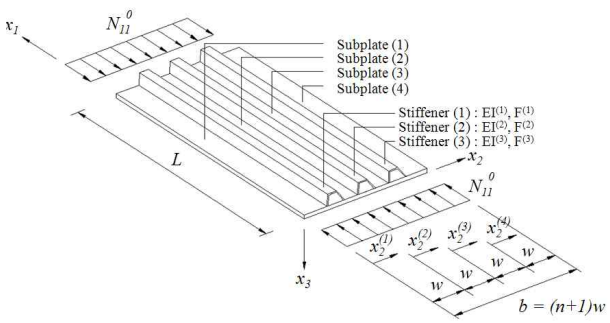
$$Since\ F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{w_1}\right)^2 \qquad \text{식 (1)}$$

$$\therefore F_{cr}(w_1) > F_{cr}(w)$$

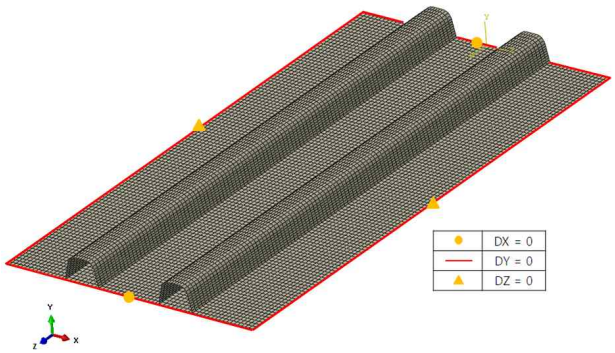
따라서, 본 연구에서는 해석결과 나타난 탄성좌굴강도를 위의 식(1)과 비교를 통해 평가해 보고자 한다.

3. 유한요소 변수 해석

유한요소 해석을 수행하기 ABAQUS에서 제공하는 S4R5요소를 w_3에 따라 12개, L에 대해서는 최소 108개 이상 분할하도록 하여 요소망을 구성하였다. 하중재하 방식은 아래 그림 3과 같이 균일한 압축응력을 양단에서 재하하였으며, 경계조건은 그림 4에서 나타낸 바와 같이 네 변 단순지지 조건을 실현하였다. U리브 크기 및 두께 강성에 따른 탄성좌굴모드 특성을 분석하기 위해 고유치해석을 실시하였다.

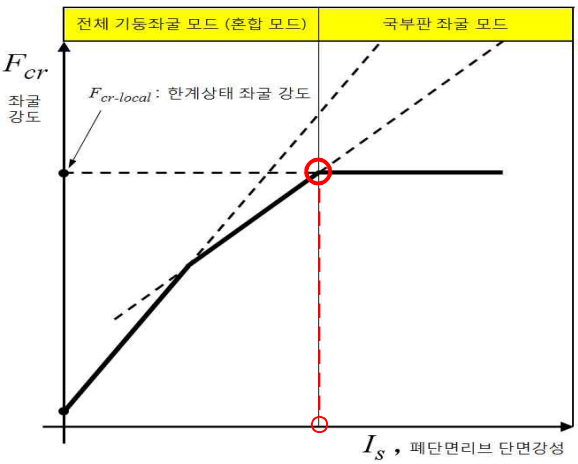


[그림 3] 폐리브보강판 구성 및 하중재하 개요도



[그림 4] 보강판 모델의 경계 조건

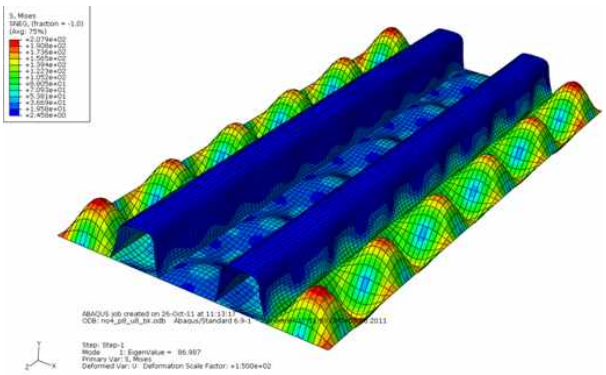
각각 3가지 타입의 U리브 두께를 변화시켜 가면서 강성변화에 따른 좌굴모드의 특성을 살펴보고자 한다. 또한 그림 5에 설명된 바와 같이, 좌굴모드 변화에 따른 최소 소요강성 개념이 U리브 보강판에서도 적용될 수 있는지 검토하고자 한다.



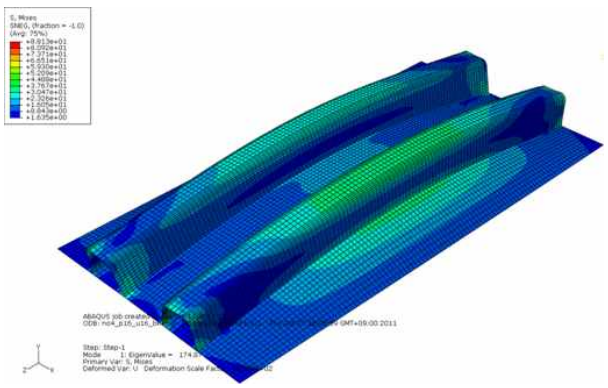
[그림 5] 보강재 최소 소요강성

4. 해석결과

본 유한요소 해석 결과, U리브 두께 변화에 따른 좌굴모드는 크게 2가지 형태로 구분되어 나타났으며, 각각 아래 그림 6과 그림 7과 같다. 여기에서, 그림 6은 국부 판좌굴 모드를 보이고 있으며 이 때, U리브는 보강된 판의 고정점을 형성하는 것을 알 수 있다. 그림 7은 U리브가 마치 압축을 받은 기둥부재와 같은 전체적인 좌굴모드를 대표적으로 나타내고 있다.



[그림 6] 보강판 모델의 국부좌굴 모드



[그림 7] 보강판 모델의 전체좌굴 모드

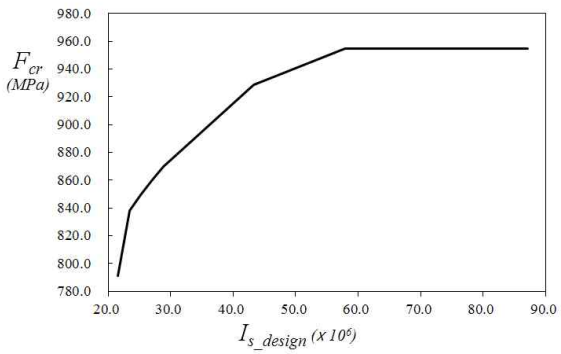
이번 연구결과로부터 확인된 U리브 보강판의 좌굴거동의 중요한 특징 중 하나는 U리브 내 구간에서도 물결모양 반사인(Half-sine)곡선의 판좌굴 거동을 보이는 점이다. 이러한 거동은 U리브 웨브간격이 클수록 명확해지는 경향을 보인다. 판좌굴의 폭이 w_1 써 나타남에 따라 U리브 보강판의 길이방향 좌굴거동을 특징짓는 유효 형상비 α_e는 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\alpha_e = b/w_1$$

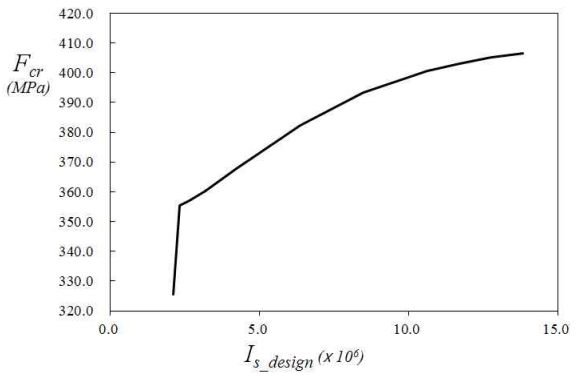
고유치 해석 결과로부터 산정된 탄성좌굴강도는 표 2에서 보이는 바와 같이 앞서 식 (1)과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

[표 2] 고유치 해석 결과

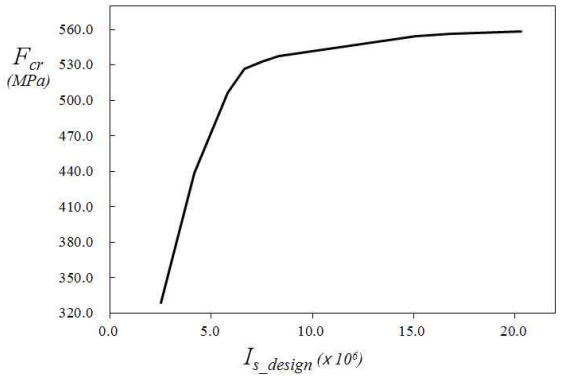
TYPE	F_{cr} (MPa)	F_{cr_theory} (MPa)	I_{s_design} (x10^6 mm^4)	mode shape
L	791.0	725.8	21.6	RF
	838.3	725.8	23.4	PB
	849.4	725.8	25.2	PB
	859.8	725.8	27.0	PB
	869.9	725.8	28.8	PB
	928.8	725.8	43.3	PB
	954.9	725.8	57.8	PB
	954.9	725.8	87.2	PB
M	325.56	305.84	2.1	RF
	355.29	305.84	2.3	PB
	357.07	305.84	2.6	PB
	360.21	305.84	3.2	PB
	367.71	305.84	4.2	PB
	382.20	305.84	6.4	PB
	393.46	305.84	8.5	PB
	400.69	305.84	10.6	PB
	403.15	305.84	11.7	PB
	405.06	305.84	12.8	PB
	406.56	305.84	13.8	PB
S	328.4	416.6	2.5	GB
	438.6	416.6	4.1	GB
	506.6	416.6	5.8	GB
	526.6	416.6	6.6	PB
	533.1	416.6	7.5	PB
	537.6	416.6	8.3	PB
	554.8	416.6	15.1	PB
	556.5	416.6	16.8	PB
	558.6	416.6	20.3	PB



[그림 8] 강성에 따른 좌굴강도 변화 (L-Type, t=8mm)



[그림 9] 강성에 따른 좌굴강도 변화 (M-Type, t=6mm)



[그림 10] 강성에 따른 좌굴강도 변화 (S-Type, t=8mm)

위의 그림 8~10은 각 해석 경우에 대한 U리브의 단면 강성에 따른 탄성 좌굴강도의 변화를 나타낸다. 이 때 U리브의 단면강성은 보강판의 상부 면에 나란한 축에 대한 단면2차모멘트로써, 개단면 리브와 유사한 방식으로 고려하기 위해 1/2 단면으로 분할하여 고려하였다. 전체좌굴 거동은 비교적 낮은 고유치 즉 작은 압축내력 상태에서 발생하며, 리브 사이에서의 국부 판좌굴 모드는 보다 강한 압축내력을 갖는 것으로 나타났다. 보강재의 강성에 따라 전체좌굴 거동 또는 국부판좌굴 거동이 상대적으로 더 지배적일 수 있음을 알 수 있다. 더 구체적으로 말해, U리브의 각 웨브가 판의 고정점을 형성할 수 있는 수준의 강성 확보 여부가 두 가지 좌굴모드의 발생 여부를 결정짓는 중요한 설계 변수가 되는 것이 파악되었다.

5. 소결

본 연구를 통해 U리브의 크기 및 강성에 따른 좌굴모드의 변화 양상에 대해 검토하였다. U리브 보강판의 탄성좌굴강도 이론값과 해석적 결과에 대해서도 비교 검토하였다. 향후, 이러한 연구가 보다 다양한 해석모델에 대해 수행된다면 보강판의 제원 및 재료 특성에 따른 U리브 최적 단면크기 및 강성을 정량적으로 평가할 수 있는 회귀식을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 2011년도 일반연구자지원사업(2011-0013918)에 의한 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 대한토목학회·교량설계핵심기술연구단, 도로교설계기준, 2008.

[2] AASHTO. LRFD Bridge design specifications. 4th ed. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.

[3] 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”, ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol.12, No.2, pp. 140-150, 2006.

[4] Yoo C.H., Choi B.H., Ford E.M. “Stiffness requirements for longitudinally stiffened box-girder flanges”. J Struct Eng, Vol.127, No.6, pp. 705-711, 2001.

[5] Choi B.H., Yoo C.H. “Strength of stiffened flanges in horizontally curved box girders”. ASCE J Eng Mech,, Vol.131, No.2, pp. 167-176, 2005.