축방향 압축을 받는 폐단면리브로 보강된 복합적층판의 전체좌굴강도 근사해 유도 및 해석적 검증 방안

박상균*, 최병호*
*국립한밭대학교 건설환경공학과
e-mail:mi061415@hanbat.ac.kr

The Korea Academia-Industrial cooperation Society

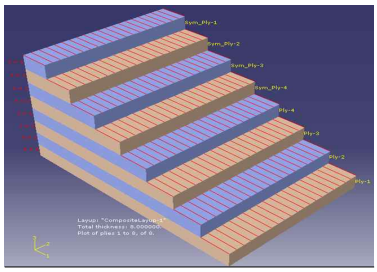
Byung-Ho Choi*, Sang-Kyun Park*
*Dept of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

요 약

폐단면리브 적용 판의 면내 압축좌굴 거동 특성 중에서 보강재 강성이 작고 비교적 낮은 임계하중을 받는 경우 전체기둥좌굴 거동이 예상된다. 본 논문은 폐단면리브 단면 강성의 고려 방안에 따라 단순보 유사모형을 정립하고 전체좌굴에 대해 에너지 근사해법을 적용하여 전체좌굴강도 근사해를 유도하기 위한 기초적인 연구방안으로써 검토한 내용을 소개하고자 한다. 유사모형의 폐단면리브 중심에서 휨강성이 발휘되는 것으로 가정하여 모형화 하였다. 폐단면리브 보강판의 프로토타입 모델에 대해 직교이방성 $[(0^\circ)_4]_s$와 Cross-ply $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$ 적층단면을 각각 고려한 유한요소 해석을 실시하였다. U리브 단면강성에 따른 복합적층 보강판의 탄성좌굴강도 해석결과를 근사해 공식과 비교하고 U리브로 보강된 복합적층판의 좌굴모드 변화양상을 수치해석적으로 검토하였다.

1. 서론

압축을 받는 판 부재는 압축 좌굴에 대한 구조적 효율성을 높이기 위해 일반적으로 종방향 보강재를 이용하여 보강된다. U형 단면 리브(이하 U리브)를 이용한 보강 판부재의 구조효율성이 높은 것으로 알려지면서 대형 구조물에도 다양한 활용사례가 나타나고 있다. 하지만, 대형구조물의 압축 판 부재에 U리브를 적용하기 위한 명확한 설계지침이나 충분한 연구자료가 제시되고 있지 못하며(도로교설계기준, 2008; AASHTO LRFD Bridge design specifications 4th ed, 2007; Chou et al.,2006), 특히 복합적층소재를 적용한 연구나 적용사례가 매우 미흡한 실정에 있어, 과다한 설계 방식이 지속되는 중요한 요인이 되고 있다. 본 논문에서는 U리브를 적용한 복합적층 이방성 평판의 유사 거동모형을 수립하여 전체좌굴강도 공식을 유도하는 방안과 이로부터 유도된 근사해를 유한요소해석 결과와 비교한 내용을 간략히 소개하고자 한다.

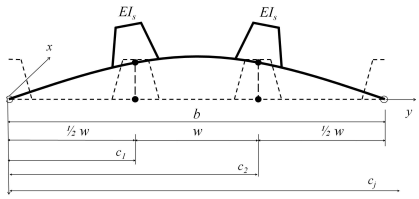


[그림 1] Cross-ply 타입 $[(0^\circ)_4]_S$ 의 적층 예

2. 유사거동모형 수립

2.1. 전체 기둥좌굴 모드의 유사모형

그림 2 와 같이 U리브 단면 강성의 고려 방안에 따라 단순보 유사모형을 정립하고 전체좌굴에 대해 에너지 근사해법을 적용하여 전체좌굴강도 근사해를 유도하였다.



[그림 2] 폐리브 보강판의 단순보 유사모형 (전체기둥좌굴거동)

U리브 적용 판의 면내 압축좌굴 거동 특성을 고려, 전체 기둥좌굴 모드에 관한 소요 공식을 도출하였다. U리브의 전체 단면 강성 EI_s항을 변수로 도입하여 전체 리브 단면의 강성에 따른 좌굴강도식을 도출하였다. 본 거동 모형의 적정성을 검증하기 위해 U리브 보강판의 프로토타입 설계 모델에 대한 유한요소해석을 실시하였다.

2.2. 에너지 근사해법 적용 좌굴강도 탄성이론식 유도

외력에 의한 좌굴 평형 상태에서 보강된 판의 total potential을 구성하여 에너지평형방정식을 정립하였다.

$$\Pi_1 = \Pi_i^P + \Pi_i^S + \Pi_a^P + \Pi_a^S \tag{2}$$

여기서, Π_i^P; 외력에 의해 판 부재에 저장되는 변형에너지,
Π_i^S; 외력에 의해 보강재에 저장되는 변형에너지,
Π_a^P; 외력이 판부재에 한 일,
Π_a^S; 외력이 보강재에 한 일

2.2.1 유사모형의 탄성좌굴강도식($N_{cr,G}^S$)

$$N_{cr,G}^S = \frac{\frac{1}{4}(D_{11}\frac{b}{a^3} + D_{22}\frac{a}{b^3}) + \frac{m_1^4}{ab}(\frac{1}{2}D_{12} + D_{66}) + \frac{m_1^4}{4a^3}nEI_s}{\frac{m_1^2 b}{4a}(1+n\delta))}\pi^2 \tag{3}$$

여기서, $\delta = \frac{E_s A_s}{E_p b t_p}$, $b = nw$,
a ; U리브의 종방향 길이,
w_1; U리브 사이의 폭,
A_s; 단순보 모형 U리브 단면적,
E_s; U리브의 탄성계수,
t_p ; 보강된 판의 두께,
E_p ; 보강된 판의 탄성계수,
I_s ; 보강된 판 상면과 나란한 축에 대한 U리브의 단면2차 모멘트

3. 해석모델

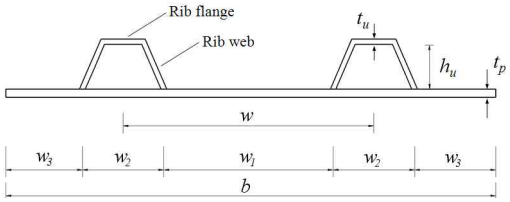
3.1. 단면제원 및 재료물성치

본 해석적 연구를 위한 해석모델의 단면은 그림 3에 보이는 바와 같이 두 개의 U리브가 w간격으로 설치되어 있다. 보강된 판의 제원은 표 1에 나타낸 바와 같다. w_2는 U리브의 폭으로써 통상 U리브 순간격 w_1에 비해 작게 적용되고, w_3는 w_1의 절반으로 설계하여 w_1이 보강판 국부좌굴의 지배유효폭이 된다. 따라서, U리브 보강판의 길이방향 좌굴거동을 특징짓는 유효 형상비 α는 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\alpha = L/w_1 \tag{1}$$

[표 1] U리브 보강판의 단면 제원

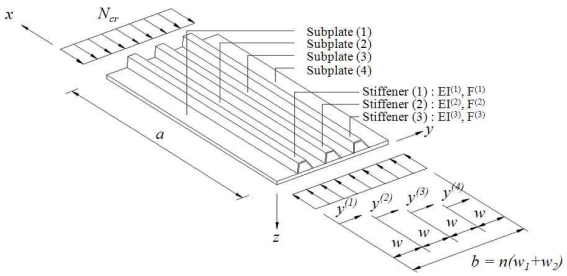
t_p (mm)	t_u (mm)	w_1 (mm)	w_1/t_p	w_2 (mm)	w_3 (mm)	n	a
8~24	3~24	250	31.3	162.4	125	2	3,5,10



[그림 3] U리브 보강판의 단면

3.2. 유한요소 모델링

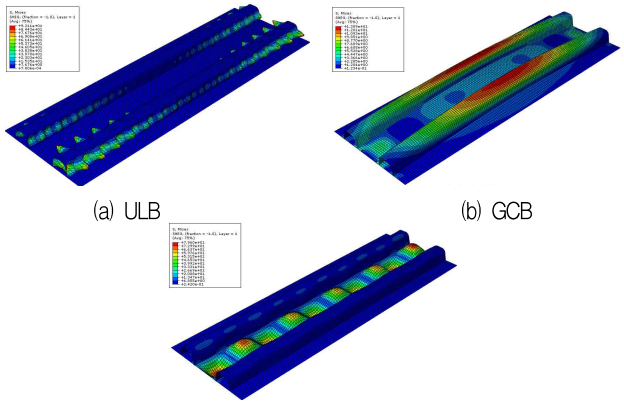
유한요소 모델링은 ABAQUS에서 제공하는 S4R5 요소를 이용하였다. 고유치가 충분히 수렴되도록 $w_1 \times w_1$ 제원을 기준으로 최소 12×12개의 요소망을 배치하여 전체 요소망을 구성하였다.(박성미와 최병호, 2011B). 하중재하 방식은 그림 4 와 같이 균일한 압축응력을 양단에서 재하하였으며, 경계조건은 네 변 단순지지 조건을 구현하였다.



[그림 4] 폐리브보강판 구성 및 하중재하 개요도

4. 해석결과

U리브 적층두께의 변화에 따른 좌굴모드는 크게 3가지 형태로 구분되어 나타났으며, 이는 그림 5 에 나타낸 바와 같다. 3가지 좌굴모드 형태는 U리브 두께의 증가에 따라 U리브 국부좌굴모드(ULB : U-rib Local Buckling), U리브의 전체 기둥좌굴모드(GCB : Global Column Buckling), 보강판의 국부좌굴 모드(PLB : Plate Local Buckling) 순으로 나타났다.



(a) ULB (b) GCB

(c) PLB

[그림 5] U리브 강성에 따른 좌굴모드 변화($[(0°/90°)_2]_S$, α =10, t_{p_ply}=1mm)

[표 2] 해석모델 전체좌굴강도 비교

a	적층각	t_{p_ply} (mm)	$t_{u_ply(req.)}$ (mm)	F_{cr} (MPa)	F_{cr_theory} (MPa)	F_{cr} / F_{cr_theory}(%)
5	$[(0°)_4]_s$	3	1	479.52	645.55	74.28
	$[(0°/90°)_2]_s$	3	1	464350	429.33	108.19
10	$[(0°)_4]_s$	2	0.6	234.47	166.78	140.59
	$[(0°/90°)_2]_s$	2	0.6	313.32	203.59	153.89

표 2에서 보이는 바와 같이, 유한요소 해석(FEM) 결과 Fcr과 좌굴강도 탄성이론식 식(3)에 의거 산정된 Fcr_theory를 비교하였다. 단순보 모형의 근사해 공식을 실용적으로 활용하기엔 다소 상당한 오차가 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 에너지 근사해법을 적용하여 좌굴강도 탄성이론식을 유도하였다. U리브로 보강된 복합적층판의 U리브 적층판 두께에 따른 좌굴모드의 변화양상을 수치해석적으로 검토하였다. U리브 적층판 두께에 따라 U리브 국부좌굴모드(ULB : U-rib Local Buckling), 보강된 판의 국부좌굴 모드(PLB : Plate Local Buckling), 전체기둥좌굴모드(GCB : Global Column Buckling) 등 3가지 좌굴모드에 의해 지배되는 것이 수치해석적으로 확인되었다. 좌굴강도 탄성이론식과 유한요소해석 결과의 차이를 비교하였다. 현재 제시된 단순보 모형의 근사해는 복합소재의 적층방식에 따라 유한요소 해석결과 평가된 엄밀해와의 차이를 나타낸다. 본 논문에 제시된 연구방식을 이용한 지속적인 연구를 통해 이러한 격차를 개선해 나가야 할 것으로 사료된다. 향후, 대칭분할 모형 등 새로운 근사해 모형을 적용하거나 좌굴형상함수 적용방법에 대해 보다 면밀한 검토가 필요한 것으로 사료된다. 변수해석 결과를 추가하고 비교분석을 통해 파라미터를 교정한다면 추후 실용적인 좌굴강도 탄성이론공식을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 일반연구자지원사업(2012-0003414) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 대한토목학회·교량설계핵심기술연구단 “도로교설계기준”, 한국도로교통협회, 2008.

[2] 박원태, “비등방성 적층 캔틸레버 박판 및 후판의 해석연구”, 한국복합신소재구조학회논문집, 제1권, 제4호, pp.1-5, 12월, 2010.

[3] 박성미, 최병호, "다각형 단면 기둥구조의 압축좌굴강도에 관한 해석적 연구", 제37회 대한토목학회 정기학술대회, 제A권, pp.17. 11월, 2011A

[4] 박성미, 최병호, “절곡 제작한 6각형 단면 기둥 국부좌굴강도의 해석적 평가”, 추계학술발표논문집, 제2권, pp.461-464, 11월, 2011B.

[5] 최수영, 최병호, “축방향 압축을 받는 폐단면리브 보강판의 좌굴거동에 관한 해석적 연구”, 한국방재학회논문집, 제12권, 제1호, pp.39-44, 3월, 2012.

[6] 최병호, 최수영, 박상균, “축방향 압축을 받는 폐단면리브로 보강된 복합적층판의 좌굴 해석연구”, 복합신소재구조학회지, 제3권, 제1호, pp.29-34, 3월, 2012.

[7] 허성필, 양원호, 성기득, 조명래, "유한요소법을 이용한 복합적층판과 보강된 복합적층 패널의 좌굴 및 좌굴후 거동에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제4호, pp.599-606, 1999

[8] Reddy, J.N., "Mechanics of Laminate composite plates and shells Theory and Analysis", CRC PRESS, SECOND EDITION, 2004

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

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