



폐단면리브로 보강된 일축압축을 받는 복합적층판의 국부좌굴강도 증가효과

황수희¹ · 김유식² · 최병호³

국립한밭대학교 건설환경공학과 석사과정¹, 국립한밭대학교 건설환경공학과 교수²,
 국립한밭대학교 건설환경공학과 조교수³

Increasing Effect in Local Buckling Strength of Laminated Composite Plates Stiffened with Closed-section Ribs under Uniaxial Compression

Hwang, Su-Hee¹ · Kim, Yu-Sik² · Choi, Byung-Ho³

¹Master Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Deajeon, Korea

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Deajeon, Korea

³Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Deajeon, Korea

Abstract: This study is aimed to examine the influence of the rotational stiffness of U-shaped ribs on the local buckling behaviors of laminated composite plates. Applying the orthotropic plates with eight layers of the layup $[(0^\circ)_4]_s$ and $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$, 3-dimensional finite element models for the U-rib stiffened plates were setup by using ABAQUS and then a series of eigenvalue analyses were conducted. There is a need to develop a simple design equation to establish the rotational stiffness effect, which could be easily quantified by comparing the theoretical critical stress equation for laminated composite plates with elastic restraints based on the Classical laminated plate theory. Through the parametric numerical studies, it is confirmed that there should clearly exist an increasing effect of local plate buckling strength due to the rotational stiffness by closed-section ribs. An applicable coefficient for practical design should be verified and proposed for future study. This study will contribute to the future study for establishing an increasing coefficient for the design strength and optimum design of U-rib stiffened plates.

Key Words: Laminated composite, Stiffened plate, Closed-section Rib, Bending stiffness, Longitudinal stiffener, Stiffness requirement

1. 서론

복합소재를 적층한 복합적층판(laminated composite plate)은 섬유배향각과 적층순서에 따라 소요강도와 강도를 조절할 수 있어 구조적으로 특수한 장점을 갖고 있다. 특히, 이러한 구조적 효율성과 더불어 자중 대비 발현강도가 크기 때문에 상대적으로 경량설계가 가능한 측면은 대형 구조물의 판 부재로서 활용되기 위한 매우 유용한 특성이다. 그러나 이러한 복합적층판 효과적 적용에 관한 다양한 연구나 명확한 설계지

침이 충분하지 못하기 때문에 실제 응용에 제약이 많을 것으로 사료된다.

압축을 받는 판 구조물의 경우 압축좌굴에 의한 구조적 효율성을 높이기 위해 종방향 보강재가 보강된다. 이때 보강재는 개단면 리브(Open-section rib)와 폐단면 리브(Closed-section rib) 두 타입으로 대별될 수 있다. 폐단면 리브는 U형 단면을 갖는 보강재(이하 U리브)로써 개단면 리브에 비해 구조적 효율성에 있어 비교 우위의 탁월한 측면이 있는데, 이는 국부좌굴 강도 증가효과로써 설명된다.

주요어: 복합구조, 보강판, 폐단면리브, 휨강성, 보강재, 소요강성

Corresponding author: Choi, Byung-Ho

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National Univ. Deongmyeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea.
 Tel: 042-821-1755, Fax: 042-821-1589, E-mail: bhchoi@hanbat.ac.kr

투고일: 2013년 4월 19일 / 수정일: 2013년 5월 16일 / 게재확정일: 2013년 5월 31일

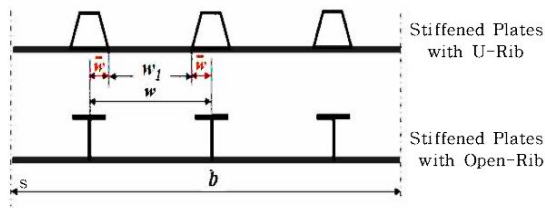


Fig. 1 Comparison of Cross-Section Shapes

Fig.1에서 볼 수 있듯이 단면 형상에 의한 특징을 비교해 볼 때, 폐단면 리브의 경우 U리브가 압축을 받는 판과 접합되어 폐합단면을 형성하게 됨으로써 유효폭(w)이 감소될 뿐만 아니라, 비틀림 거동과 보강재 자체의 구조적 안정성이 높아 국부좌굴강도에 있어 증가효과가 있을 것으로 기대된다.

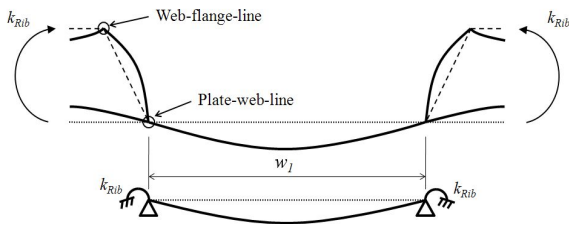


Fig. 2 Rotational Behavior of Closed-Section Rib

특히 U리브의 경우 구조적 안정성과 비틀림 강성이 매우 크게 작용되기 때문에, Fig. 2에 표시된 바와 같이 유효스프링강성(K_{Rib})으로 인하여 상대적으로 유리한 강도성능이 발휘될 수 있다. 국내에서는 설계 및 제작 과정의 단순성으로 인해 교량구조물의 경우 개단면리브 적용 방식이 보다 선호되고 있으나, U리브의 구조적 효율성이 알려지면서 선진 구미지역을 중심으로 다양한 활용사례가 나타나고 있다. 하지만 여전히 U리브와 같은 폐합단면 리브를 적용하여 상기와 같이 좌굴강도 증가효과를 고려하기 위한 합리적 설계지침이나 명확한 자료가 제시되어 있지 않은 것으로 사료된다(AASHTO LRFD, 2007; Eurocode 3, 2003).

따라서, 본 논문은 이러한 U리브의 합리적인 활용 방안을 도출하기 위한 선행 연구로써, 폐단면 리브 적용에 의한 복합적층판의 국부좌굴강도 증가 효과를 수치해석적 접근 방식을 활용하여 정량적으로 검토해 보고자 한다. 다시 말해, U리브 크기와 강성변화에 따른 복합적층판의 압축좌굴 거동 및 탄성좌굴거동에 대한 수치해석적 변수연구를 실시하여 기존 이론식과 비교해보고자 한다. 일반적인 박판 범위에 대해 고전

적인 적층 판이론(Classical laminated plate theory)에 근거하여 탄성구속효과를 정량화하기 위한 기초자료를 확보하기 위해 유한요소해석 방안을 도출하고 변수연구를 수행하였으며, 이러한 해석결과와 이론적 근사해의 비교 검토를 통해 보다 합리적인 설계공식의 개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 유사거동모형 수립

2.1 탄성스프링 구속패널 모형

폐단면 리브로 종방향 보강된 판구조의 국부좌굴 거동은 리브 웹 간의 순간적인 w_1 에 의한 4변 단순지지 평판으로 단순하게 묘사될 수도 있다. 폐단면 리브의 배치형상 및 강성에 따라 다르지만, 폐리브 순간격 w_1 과 폐리브 내 간격 w_2 가 서로 동일하지 않을 때 판좌굴 거동에 있어 부등 좌굴길이가 발생할 수 있다.

이러한 부등 간격은 한 단면 내 유효 좌굴길이가 달라지는 것을 의미하며, 좌굴 거동 시에 단쪽부에 의한 상대적 구속효과가 발생할 것으로 예상된다. 이때 예상되는 구속효과로 인한 좌굴형상의 적합성을 확보하고자, Fig. 3과 같이 폐리브의 단면비틀림 강성에 비례하여 양 단의 회전변위가 구속되는 탄성스프링서브패널 모형을 응용하도록 한다. 상기 탄성스프링 구속패널 모형은 양 단에 회전변위에 저항하는 탄성스프링이 있는 4변 단순지지 평판으로 모형화하여 이론식을 적용하도록 한다.

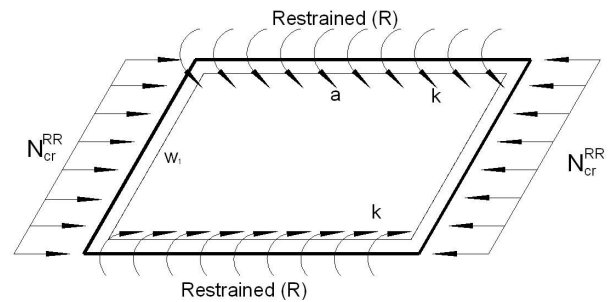


Fig. 3 Elastic-Spring Restrained Panel Model

2.2 에너지 평형방정식 수립

탄성스프링구속패널 모형을 적용한 복합적층판의 좌굴강도공식은 에너지 근사해법에 의해 단순한 형태로 유도될 수 있다. 이 때, 외력에 의한 좌굴 평형 상태에서 보강된 판의 Total potential은 식 (1)과 같이 정립될 수 있다.

$$\Pi_1 = \Pi_i^P + \Pi_i^R + \Pi_a^P \quad (1)$$

식 (1)에서 Π_i^P 과 Π_i^R 은 각각 외력에 의해 판 부재에 증가되는 변형에너지와 외력에 의해 양 옆 탄성스프링강성에 저장되는 변형에너지를 뜻하며, Π_a^P 는 외력이 판 부재에 한 일을 뜻한다.

2.3 유효스프링강성에 의한 좌굴강도공식

폐단면 리브를 적용함으로써 기대되는 비틀림 강성 증가효과는 유효폭(w_1)의 양단 고정점에서 회전 변위 (ϕ)에 대한 유효스프링강성(k_R)으로써 표현될 수 있으며, 이를 수식화하면 식 (2)와 같다.

$$k_R = \frac{M_R}{\phi} \quad (2)$$

여기서, M_R 은 U리브의 축방향으로 발생하는 비틀림 모멘트 효과를 의미하며, ϕ 는 U리브의 웨브가 접합된 양 단에서 판의 단면 회전각을 뜻한다.

상기 식 (2)의 각 핵심 설계파라미터를 고려하여 유효스프링강성을 수식화하면 U리브로 보강된 복합적층판의 국부좌굴강도 공식은 다음 식 (3)과 같이 고전적인 적층판 이론에 의거하여 유도될 수 있다 (Reddy, 2004; Shan과 Qiao, 2008).

$$N_{cr}^{RR} = \frac{24}{w_1^2} (1.871 \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} \sqrt{D_{11}D_{22}} + \frac{\tau_3}{\tau_1} (D_{12} + 2D_{66})) \quad (3)$$

이 때, $\tau_1 = 124 + 22 \frac{k_R w_1}{D_{22}} + \frac{k_R^2 w_1}{D_{22}^2}$,

$$\tau_2 = 24 + 14 \frac{k_R w_1}{D_{22}} + \frac{k_R^2 w_1}{D_{22}^2}$$

$$\tau_3 = 102 + 18 \frac{k_R w_1}{D_{22}} + \frac{k_R^2 w_1}{D_{22}^2}$$

$$N_{cr}^{RR} = \Phi(k_R) N_{cr}^{SS} \quad (4)$$

여기서, $\Phi(k_R)$ 는 유효스프링강성에 의한 강도증가 계수이며, N_{cr}^{SS} 은 4변 단순지지 복합적층판의 국부좌굴강도로서 다음과 같이 표현된다 (Reddy, 2004).

$$N_{cr}^{SS} = \left(\frac{m_1^2}{a^2} D_{11} + \frac{a^2}{m_1^2 w_1^4} D_{22} + \frac{4}{w_1^2} \left(\frac{1}{2} D_{12} + D_{66} \right) \right) \pi^2 \quad (5)$$

3. 유한요소해석

3.1 단면제원

본 연구의 해석적 검토를 위한 모델은 단면 횡방향으로 임의 개수의 U리브가 적용된 보강판의 일부를 떼어놓은 개념으로써 Fig. 3에 보이는 바와 같이 분할 표준모형을 수립하였다. 여기서 보면, U리브가 중심 간격 w 로 대칭을 이루어 설치되어 있다. 특히, 분할 표준모형은 보강판 전체의 좌굴거동과 유사하도록 하기 위해 폐단면 리브 강성에 의한 스프링구속효과의 연속성과 대칭성을 유지하도록 하는 데 중점을 두었다. 따라서, 본 해석모델에서는 양 끝단에 U리브의 반 단면이 설치되고 Fig. 4와 같은 경계조건이 적용되었다.

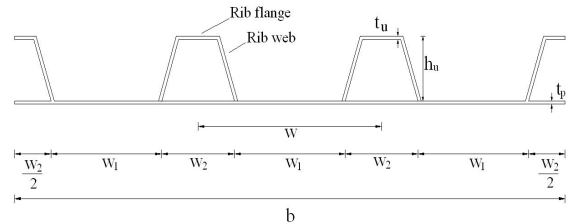


Fig. 4 Partial modeling of U-rib stiffened plates

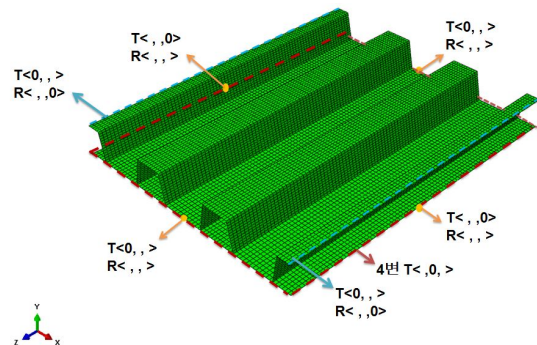


Fig. 5 Finite Element Mesh and Boundary Condition of the Stiffened Plate Model

이 때, 보강판의 제원은 Table. 1에 제시된 바와 같다. Table 1에 제시된 제원정보는 국내외 U리브 적용 구조물의 설계 자료를 참고하여 선정되었다 (Chou와 2006; AASHTO LRFD, 2007; 한국도로교통협회, 2010). 상기 제시된 제원정보는 원래 등방성 재료로 설계된 결과들이나, 이를 본 해석연구에 응용하면 복합재료를 적용한 경우와의 비교도 될 수 있을 것으로 사료된다.

w_2 는 U리브의 폭으로써 통상 U리브 순 간격 w_1 에 비해 통상 작게 적용되며, 따라서 w_1 이 보강판 국부좌굴의 지배유효폭이 될 수 있을 것으로 전제하여 세장

비 등 해당 설계파라미터와의 비교 검토를 진행하였다.

Table 1. Sectional Dimensions of U-Rib Stiffened Plates

t_p (mm)	w_1 (mm)	w_1/t_p	w_2 (mm)	n	α
8	250	31.25	221.6	2	3
16	250	15.63	221.6	2	3
8	250	31.25	221.6	2	5
16	250	15.63	221.6	2	5
8	250	31.25	221.6	2	7
16	250	15.63	221.6	2	7

3.2 유한요소 모델링

유한요소 모델링은 범용해석프로그램 ABAQUS에서 제공하는 S4R5요소를 이용하였다. U리브의 단면 강성에 따른 좌굴강도에 대한 영향을 살펴보기 위해, U리브 복합적층판의 두께 변화에 따른 고유치 해석을 실시하였다. 이 과정에서 이전 연구결과를 검토하여 고유치가 충분히 수렴될 수 있도록 유한요소망은 $w_1 \times w_1$ 제원을 기준으로 최소 12×12개의 요소망을 배치하여 전체 요소망을 구성하였다 (Choi와 Yoo, 2005; 박성미와 최병호, 2012; 최수영과 최병호, 2012). 하중재하 방식은 단면적 평균에 따른 균일한 단위 압축응력을 양단에 있는 보강된 판과 폐단면 리브의 모든 절점에 재하하였다.

복합소재의 적층구조와 배향각에 따른 변화를 검토하기 위해 Transversely isotropic 및 orthotropic 재료의 이론 정립 후, Table 2와 같은 각 Lamina의 재료물성치를 적용하였다.

본 논문에서는 복합적층판의 Lay-up은 Cross-ply타입인 $[(0^\circ)_4]_s$ 와 $[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$ 두 가지 타입을 적용하였다. 각 층마다의 Lay-up orientation을 설계한 대로 적용하기 위해 ABAQUS CAE의 Composite Layups 기능을 이용하여 적층 단면구조의 수치모델링을 구성하였다. 이러한 방식으로 해당 Lay-up orientation을 갖는 U리브로 보강된 복합적층판을 수치해석적으로 구현하였다.

Table 2. Material Properties

Properties	Value
E11	138,000 MPa
E22	8,960 MPa
G12	7,100 MPa
G13	7,100 MPa
G23	7,100 MPa
ν_{12}	0.3

4. 해석결과

본 수치해석 연구로부터 얻은 좌굴모드형상은 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 보이는 바와 같이, U리브 단면이 충분한 강성을 가지면 예상된 대로 국부좌굴 거동 시에 U리브가 설치된 위치에서 보강된 판의 고정점이 형성되며 유효폭 w_1 에 의해 지배되고 있다. 본 연구결과로부터 확인된 복합적층 U리브 보강판에서 국부좌굴모드의 특징은 U리브를 구성하는 국부 판의 단면에도 국부좌굴거동이 유발되고 있으며 U리브 유효폭 구간 내에서도 반사인(Half-sine)곡선의 거동을 보인다는 점이다. 이는 w_1 구간 판 좌굴에 일정 수준의 구속 효과를 주고 있다. 이러한 구속효과는 본 수치해석 결과로부터 정량적으로 평가되었다. Table 3에서 각 해석모델에 대해 산정된 강도증가계수인 $\Phi(K_R)$ 을 살펴보면 1.0보다 상당히 크며, 이는 단순지지 판에 비해 국부좌굴강도에 상당한 증가가 발현된 것을 명확히 볼 수 있다.

해석결과(F_{cr_FEM})와 이론적 근사해인 식 (3)에 의한 값들(F_{cr_RR})을 비교해보면 서로 밀접한 상관관계를 보이고 있으며 이론적 근사해가 수치해석과 유사한 결과를 제시하고 있음을 볼 수 있다. 하지만 일정수준 이상의 오차범위도 나타나고 있어 해당 이론식의 교정 필요성도 제기되고 있다.

변수해석 결과로부터 분석된 U리브의 국부파괴 및 좌굴을 방지하기 위한 최소두께(t_{u_limit})는 적층배향각과 Ply두께에 따라 달라지는 것으로 나타났는데, U리브가 적층 판의 두께가 작은 범위 내에서는 리브 자체의 국부좌굴에 지배를 받으므로 적정 두께를 확보하지 못하는 경우 좌굴강도가 매우 저하된다. 이는 등방성 재료로 구성된 U리브 강성에 따른 보강판의 좌굴모드 및 강도변화에 대한 변수해석 연구 결과에서 나타난 바와 유사한 특성을 보이고 있다 (최수영과 최병호, 2012). 본 해석적 연구 결과로부터 동일한 재료를 적용하더라도 적층 배향각 구조에 따른 좌굴강도에 대한 영향을 비교해 볼 수 있다.

Table 3. Analysis Results of Stiffness Ratio

t_u (mm)	t_p (mm)	α	cross-ply	F_{cr_RR} (MPa)	F_{cr_FEM} (MPa)	$\Phi(K_R)_{theory}$ (MPa)	$\Phi(K_R)_{FEM}$ (MPa)	$\Phi(K_R)_{theory} / \Phi(K_R)_{FEM}$ (%)	MODE
4.0	8.0	3	[(0°)4]s	113.52	123.89	1.26	1.38	92%	PLB
4.0	8.0	3	[(0°/90°)2]s	236.45	206.25	1.39	1.22	115%	PLB
8.0	16.0	3	[(0°)4]s	454.08	450.21	1.29	1.27	101%	PLB
24.0	16.0	3	[(0°/90°)2]s	1069.43	899.24	1.60	1.35	119%	PLB

각각 [(0°)4]s과 [(0°/90°)2]s로써 적층된 경우, 국부좌굴에 대해 상당한 강도 차이를 보이며 구조 효율성이 비교될 수 있다. 이에 더하여, 유효스프링강성(K_R)에 따른 강도 증가효과도 이러한 적층구조에 따라 영향 받는 것을 볼 수 있다. [(0°/90°)2]s 적층된 경우에 대해 이론적 근사해는 보다 과도한 평가를 하고 있으므로, 향후 배향각 특성에 따른 보정 방안이 제시될 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문은 강성에 따른 탄성좌굴강도를 살펴보고자 연속성과 대칭성을 고려한 분할 표준모형을 수립하고 변수해석적 설계모델에 대해 3차원 유한요소해석을 수행하여 적층판 좌굴강도 및 폐단면 리브 적용 시의 증가효과에 대해 검토하였다. 본 해석결과 분석으로부터 해석대상 모델범위에 대해 U리브로 보강된 복합적층판은 단순지지 조건에 의한 판좌굴 강도에 비해 상승효과가 있음을 정량적으로 파악할 수 있었다. 이로부터 폐단면리브를 적용한 복합적층판의 설계 시에 폐단면리브 구간 내 부등 간격 판좌굴 거동으로 인한 단쪽부 구속효과를 고려함으로써 보다 합리적인 설계가 가능할 것으로 사료된다.

추후, 보다 다양한 단면제원 및 적층배향각과 ply 두께에 따른 변수연구가 필요한 것으로 판단되며 이러한 연구는 소요 설계기준과 최적 설계방안에 대해 유용한 정보를 제시해 줄 것으로 판단된다. 이러한 연구결과들은 실험적 검교정 과정이 수반되어야 실무에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007), AASHTO. LRFD Bridge design specifications. 4th ed, Washington (DC).
 European Committee for Standardisation. (2003), Eurocode 3: Design of steel structures.

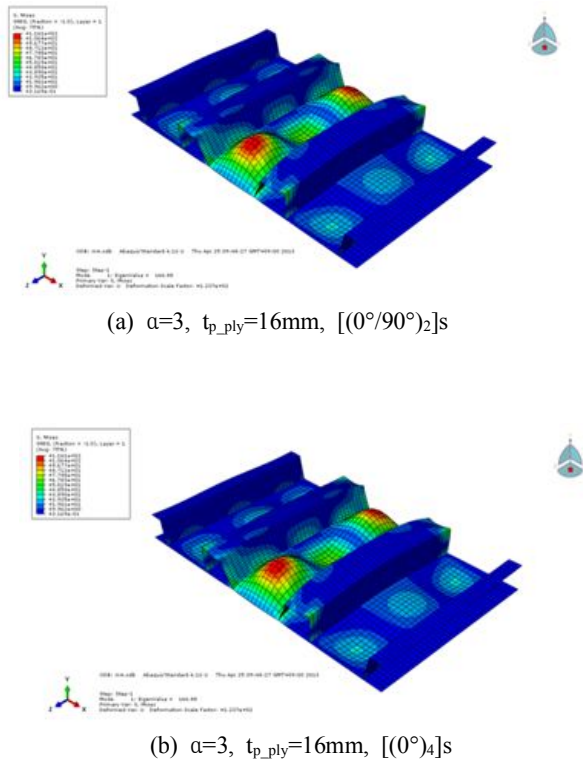


Fig. 6 Plate Local Buckling Mode(PLB) of U-Rib Stiffened Plate

- Choi, B. H. and Yoo, C. H. (2005), "Strength of stiffened flanges in horizontally curved box girders," *ASCE J Eng Mech*, Vol. 131, No. 2, pp. 167-176.
- Choi, S. Y. and Choi, B. H. (2012), "Buckling behavior of longitudinally stiffened steel plates by U-shaped ribs," *J. Korean Soc. Hazard Mitigation.*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-44.
- Chou, C. C., Uang, C. M., and Seible, F. (2006), "Experimental evaluation of compressive behavior of Orthotropic Steel Plates for the New San Francisco-Oakland Bay Bridge," *ASCE J. Bridge Eng.*, Vol. 12, No. 2, pp. 140-150.
- Korean design specifications for roadway bridges. (2010), Korea Road and Transportation Association.
- L. Shan, P. Qiao. (2008), "Explicit local buckling analysis of rotationally restrained composite plates under uniaxial compression," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 1, pp. 126~140.
- Park, S. M. and Choi, B. H. (2012), "Finite element analyses on local buckling strength of polygonal-section shell towers," *J. of academia-industrial technol.*, Vol. 13, No. 4, pp. 1900-1907.
- Reddy, J. N. (2004), "Mechanics of Laminate composite plates and shells Theory and Analysis," CRC PRESS, SECOND EDITION.
- Romeo, G. (1986), "Experimental investigation on advanced composite stiffened structures under uniaxial compression and bending." *AIAA J.*, Vol. 24, No. 11, pp. 1823-1830.