

복합적층 패널로 보강된 단순지지 판의 좌굴해석

Buckling Analysis of Simple Supported Plate Stiffened with Laminated Composite Panel

박 대 용¹⁾ · 장 석 윤²⁾
Park, Dae Yong · Chang, Suk Yoon

요 약 : 본 연구에서는 보강판의 좌굴방지를 위해 기존에 주로 사용되는 보강재를 복합재료를 사용하여 대체하는 새로운 개념을 소개한다. 강재 보강재를 복합재료로 대체함으로써 용접의 불편함과 피로 등에 의한 손상 및 부식을 원천적으로 제거할 수 있다. 강판에 접착되는 복합재료는 강판이 좌굴할 때까지 완전히 접착된 것으로 가정하였다. 이렇게 구성되는 판은 길이와 폭 방향으로 변단면의 형태를 가지며 비등방성의 재료특성을 나타낸다. 이러한 비등방성 변단면 판의 좌굴해석을 위해 범용 유한요소 프로그램인 LUSAS를 사용하였으며 여러 가지 매개변수 변화 해석을 통해 비등방성 변단면 판의 좌굴거동 특성을 살펴보았다.

ABSTRACT : This paper introduces a new theory, that in a stiffened plate, a steel stiffener could be substituted a composite material in order to prevent from buckling. Changing a steel stiffener into a composite material would not only preclude welding, but could also prevent damage to the material due to fatigue and corrosion. A composite material is assumed to adhere to a steel plate, and is never separated from the plate until the steel plate reaches buckling. Such plate has variable shapes, with different lengths and widths, and also shows an anisotropic material property. LUSAS, a commercial finite element analysis package, was used in the buckling analysis. This paper investigated buckling behavior in anisotropic composite plates with variable parameters.

핵심용어 : 보강판, 보강재, 복합재료, 비등방성, 변단면, 유한요소해석, 좌굴

KEYWORDS : stiffened plate, stiffener, composite material, anisotropic, variable section, finite element analysis, buckling

1. 서 론

강구조물에 있어 많은 손상 요인들 중 용접과 용접에 의한 피로 손상은 자주 나타나는 현상이다. 특히 보강재는 주부재에 용접되는 부부재로써 강구조물의 좌굴을 방지하기 위해 많이 사용되고 있다. 이러한 보강재의 용접의 불편함과 용접에 의한 피로손상을 원천적으로 제거하기 위해 본 연구에서는 보강재의 사용을 복합재료를 사용하여 대체하고 그 적용성 및 좌굴거동 특성을 살펴보고자 하였다. 부가적인 장점으로 복합재료로 패칭함으로써 부식에 의한 강판의 손상을 방지할 수 있다.

복합재료는 주로 여러 가지 섬유(fiber)와 수지(resin)로 구성되며 최근 들어 강이나 콘크리트를 대체하거나 이를 보강

하기 위한 신소재로 각광받고 있다. 복합적층구조는 높은 강도-자중 비 때문에 선박과 항공우주산업분야 및 다른 공학분야에도 많이 사용되어지고 있다.

보강재를 복합재료로 대체하는 일반적인 개념은 그림 1에 나타나있으며 사용되는 복합재료는 에폭시 본드 등에 의해 강판에 접착되며 강판이 좌굴할 때까지 완전히 접착되어 강판과 일체 거동하는 것으로 가정한다. 즉, 페이스는 복합재료, 코어는 강재로 형성되는 샌드위치 형태가 된다.

이러한 형태가 되면 판은 길이와 폭 방향으로 변단면의 형태를 가지며 비등방성의 재료 특성을 나타낸다. 비등방성의 재료특성을 갖는 구조의 좌굴해석은 등방성 재료에 비해 해석이 난해하며 특히 변단면의 형태를 가지는 경우에는 좌굴거동 파악이 더욱 어렵다.

1) 학생회원, 서울시립대학교 토목공학과, 박사과정
(Tel. 02-2210-2273, Fax. 02-2217-6800, E-mail : dypark@uos.ac.kr)
2) 명예회원, 서울시립대학교 토목공학과, 교수(changsy@uos.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회담을 게재하겠습니다.

본 연구에서는 보강판에 대한 규정은 도로교 설계기준 (2003)을 준용하였으며 보강판의 보강재를 복합재료로 대체하는 새로운 개념을 소개하고 복합재료로 대체시 발생하는 비등방성과 변단면의 특성을 보이는 판의 좌굴거동 특성을 유한요소법을 사용하여 여러 가지 매개변수 변화를 통해 알아보고자 한다.

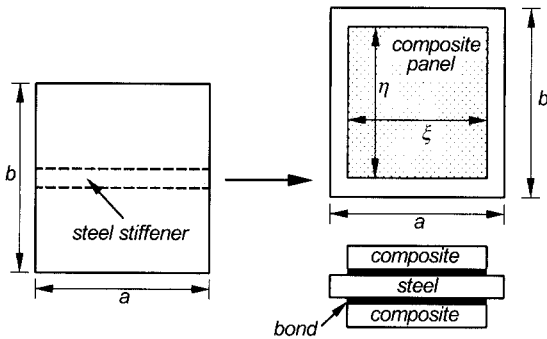


그림 1. 보강재를 복합재료로 대체하는 개념도

2. 해석모델 선정

2.1 도로교 설계기준(2003)

해석모델 선정에 앞서 도로교 설계 기준·해설(대한토목학회, 2003)에서 제시하고 있는 압축응력을 받는 보강된 판에 대한 보강판의 두께 규정과 보강재의 규정을 먼저 살펴보고 해석모델을 선정하고자 한다.

강재 판 두께 변화에 따른 압축응력을 받는 보강된 판의 최소판 두께는 표 1과 같다. 표 1에서 i 는 응력구배계수이며 본 연구에서는 일정한 압축하중을 받는 경우로 가정하였으므로 $i = 1$ 이다. n 은 종방향 보강재에 의해 나누어지는 패널의 수이다.

보강재에 대하여 요구되는 단면적(A_{re}) 및 단면2차모멘트(I_{re})에 대한 규정은 식 (1)과 같다.

$$A_{re} \geq \frac{bt}{10n}, I_{re} \geq \frac{bt^3}{10.92} \gamma \quad (1)$$

여기서, t 는 보강된 판의 두께(cm), b 는 보강된 판의 폭(cm), n 은 종방향보강재에 의해 나누어지는 패널의 수, γ 는 종방향보강재의 소요강비이다.

단순지지 역할을 수행할 수 있는 종방향 보강재의 소요강비 γ 는 다음과 같이 산출한다.

1) $\alpha < \alpha_0$ 이면서 횡방향 보강재 1개의 단면2차모멘트

I_t 가 식 (2)를 만족하는 경우 :

$$\begin{aligned} \gamma &= 4\alpha^2 n \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 (1 + n\delta) - \frac{(\alpha^2 + 1)^2}{n} \quad (t \geq t_0) \\ &= 4\alpha^2 n (1 + n\delta) - \frac{(\alpha^2 + 1)^2}{n} \quad (t < t_0) \end{aligned} \quad (2)$$

$$I_t \geq \frac{bt^3}{10.92} \left(\frac{1 + n\gamma}{4\alpha^3} \right) \quad (3)$$

2) 횡방향 보강재가 없거나, 1)의 규정을 만족하지 않는 경우 :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{n} \left(2n^2 \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 (1 + n\delta) - 1 \right) \quad (t \geq t_0) \\ &= \frac{1}{n} ([2n^2(1 + n\delta) - 1]^2 - 1) \quad (t < t_0) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, α 는 보강판의 형상비(a/b), δ 는 종방향보강재 1개의 단면적비(A/bt), t_0 는 표 2에 제시된 보강되는 판의 두께(cm)이다. 본 연구에서는 식 (4)의 규정에 해당하는 예제를 선정하였으며 보강된 판의 두께(t)는 항상 보강되는 판의 두께(t_0)보다 작은 경우로 가정하였다. 따라서, 식 (4)의 두 번째 식이 적용된다. 한 예로 종방향 보강재가 1개($n = 2$)이고 식 (1)의 최소요구단면적($A_{re} = bt/10n$)을 적용하면 δ 는 0.05가 된다.

식 (4)의 γ 는 Timoshenko(1963)가 제시한 4변이 단순 지지된 보강판의 좌굴응력 계산식 (5)에서 좌굴하중 매개변수(k)값을 결정하는 판에 대한 보강재의 강성비를 의미하며 도로교 설계기준에서 정하고 있는 최소 단면2차모멘트값(식 (1))을 적용하면 29.92가 된다. γ 값이 커진다는 것은 판의 변장비(a/b) 및 판과 보강재의 면적비(δ) 변화에 따라 보강판의 좌굴하중의 변화는 거의 없는 것을 의미하며 도로교 설계기준에서는 γ 값을 크게 요구하고 있다. 즉, γ 가 25이상부터는 좌굴하중 매개변수(k)의 변화가 거의 없다(Timoshenko, 1963).

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 h}, \frac{a}{b} = \beta, \frac{EI}{bD} = \gamma, \frac{A}{bh} = \delta \quad (5)$$

이러한 설계기준에 기초하여 본 연구에서 선정한 해석모델은 첫 번째, 보강판에 대해서는 SM490 강재에 대한 최소 판

두께 규정인 $b/48in$ 을 사용하였으며 i 는 일정한 압축응력을 받는 경우로 가정하였으므로 1.0이고 n 은 보강재를 1개를 사용하였을 경우로 가정하였으며 그 값은 2가 된다. 두 번째, 보강재에 대해서는 식 (1)과 (4)의 규정에서 최소값을 적용하였다. 다른 강종을 선정하더라도 좌굴하중 해석결과는 무차원화 되기 때문에 표 1의 두께 규정에 대해 SM490 강재의 해석결과와 비슷한 분포를 보이게 된다. 따라서, 대표적인 강종으로 SM490을 선정하였다.

표 1. 압축응력을 받는 보강된 판의 최소 판 두께

강종 (mm) 강재 판 두께	SS400	SM490	SM490Y	SM570
	SM400 SMA41		SM520 SMA50	SMA58
40이하	$\frac{b}{56 in}$	$\frac{b}{48 in}$	$\frac{b}{46 in}$	$\frac{b}{40 in}$
40 초과 75이하	$\frac{b}{58 in}$	$\frac{b}{50 in}$	$\frac{b}{48 in}$	$\frac{b}{42 in}$
75 초과 100이하			$\frac{b}{48 in}$	$\frac{b}{42 in}$

표 2. 보강되는 판의 두께(cm), t_0

강종	SS400 SM400 SMA41	SM490	SM490Y SM520 SMA50	SM570 SMA58
t_0	$\frac{b}{28 in}$	$\frac{b}{24 in}$	$\frac{b}{22 in}$	$\frac{b}{22 in}$

2.2 복합재료 패칭 매개변수

2.1절의 도로교 설계기준에서 제시한 예제를 바탕으로 보강재를 대체하는 복합재료를 선정하였다. 강재 판에 패칭하기 위해 사용된 복합재료로는 섬유는 Glass Fiber이고 수지는 Epoxy를 사용한 Gl.-Ep.와 섬유는 Graphite이고 수지는 Epoxy를 사용한 Gr.-Ep.를 선정하였다. 이에 대한 물성치 (Reddy, 1997)는 식 (6)에 나타내었다.

이렇게 선정된 복합재료에 대해 첫 번째, 패칭된 두께가 보강판의 두께와 같은 경우에 대해 보강판의 좌굴하중과 비교하였다. 두 번째, 이러한 비교를 바탕으로 보강판의 좌굴능력과 동등이상의 성능을 갖는 패칭두께를 결정하기 위해 패칭두께를 매개변수로 선정하여 좌굴해석을 수행하였다. 세 번째, 강재 판에 붙여지는 복합재료의 패칭면적이 길이와 폭 방향으로 비례하여 같이 줄어드는 경우에 대해 좌굴거동을 분석하였다. 네 번째, 강재 판에 붙여지는 복합재료를 압축하중을 받는 직각방향으로만 면적을 줄여 스트립 형태로 패칭한 경우의 좌굴하중의 변화를 살펴보았다. 다섯 번째, 강재 판에 붙여진 복합재료의 배열각도 변화에 따른 좌굴거동을 살펴보았다.

GlassFiber-Epoxy

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 5.484 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 E_2 &= 1.828 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 G_{12} &= 0.914 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 G_{23} &= 0.351 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 G_{13} &= G_{12} \\
 \nu_{12} &= 0.25
 \end{aligned}
 \tag{6a}$$

Graphite-Epoxy

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 1.406 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \\
 E_2 &= 0.914 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 G_{12} &= 0.724 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 G_{23} &= 0.633 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \\
 G_{13} &= G_{12} \\
 \nu_{12} &= 0.3
 \end{aligned}
 \tag{6b}$$

3. 수치해석예제 및 결과분석

3.1 유한요소해석(보강판)

여러 가지 해석 매개변수들에 대한 좌굴하중을 산정하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS(FEA, Ltd., 2004)를 사용하였다. 사용한 요소는 먼저 강재 보강판에 대해서는 전단변형을 고려한 4절점 감절점 쉘요소(QTS4)를 보강재에 대해서는 2절점 비선형 보요소(BTS3)를 사용하여 좌굴해석을 수행하였다. 보강재에 대한 편심과 비틀림에 대한 강성은 고려하지 않았다. 두 번째로 복합재료로 패칭된 판에 대해서는 FSDT(First-Order Shear Deformation Theory)와 적층(Laminate)이론을 적용한 4절점 감절점 쉘요소(QTS4)를 사용하였다.

프로그램에 대한 검증은 그림 2a와 같이 4변이 단순지지되고 일정하게 순수압축을 받는 정사각형 보강판에 대한 좌굴파라미터를 Timoshenko(1963) 및 Srivastava 등(2003)의 결과와 비교하여 표 3에 제시하였다. 해석에 사용된 탄성계수(E)는 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, 프아송비(ν)는 0.3, 비틀림강성과 보강재의 편심은 고려하지 않았다. 사용된 요소수는 전체 판에 대해 8×8, 보요소는 8개이며 단순지지의 경계조건은 그림 2b에 나타나있다. LUSAS의 결과는 전단변형을 고려한 일반적인 등매개변수 9절점 판 요소를 사용한 Srivastava 등(2003)의 결과와 1%의 차이를

보였고 Timoshenko 등(1963)의 결과와는 4%의 차이를 나타내었다.

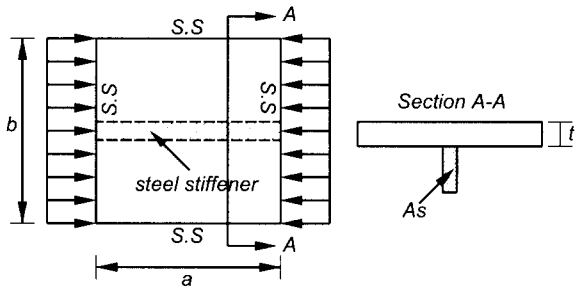


그림 2. 4변 단순지지된 일정한 순수압축을 받는 보강판

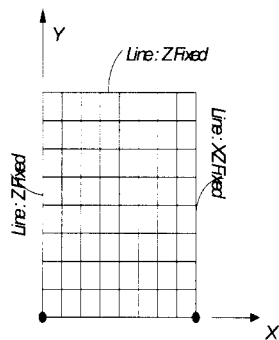


그림 3. 4변 단순지지된 판의 경계조건

표 3. 4변 단순지지 정사각형 보강판의 좌굴 파라미터

$$n = \lambda b^2 / (\pi^2 D)$$

δ	Timoshenko & Gere(1963)	Srivastava 등 (2003)	LUSAS
0.05	12.00	12.62	12.48
0.1	11.10	12.39	12.42

Notes : $EI_s / (Db) = 5.0$, $\delta = A_s / (bt)$, $D = Et^3 / (12(1-\nu^2))$

3.2 유한요소해석(복합재료 패칭 판)

3.2.1 강제 보강판과 복합재료 패칭 판과의 비교

먼저 그림 2, 3과 같이 판의 가운데 하나의 강제 보강재가 배치된 경우와 보강재를 대신하는 두 가지 복합재료로 패칭되고 패칭된 두께는 강제 판의 두께와 같고 패칭 면적은 판의 전체 면적에 모두 패칭한 경우($\xi/a = \eta/b = 1.0$, 그림 1)에 대해 변장비 변화에 따른 무차원 좌굴하중을 비교하여 그림 4에 나타내었다. GI.-Ep. 복합재료로 패칭한 경우 변장비 (a/b)가 0.7이상일 때는 강제 보강판에 비해 작은 좌굴하중을 나타내었다. 그러나, 변장비가 0.7이하에서는 패칭에 의한

좌굴하중의 증가가 매우 크게 나타났다. Gr.-Ep. 복합재료로 패칭한 경우는 변장비가 1.1이하인 경우 강제 보강판에 비해 좌굴하중의 증가가 매우 크게 나타났다. 즉, GI.-Ep.인 경우에는 0.7이하에서 패칭의 효과가 크며 Gr.-Ep.인 경우에는 1.1이하에서 패칭의 효과가 큼을 의미한다.

이렇게 두 재료가 변장비 변화에 따라 다른 좌굴거동을 보이는 이유는 압축하중을 받는 방향의 Gr.-Ep.의 1방향 탄성계수(E_1)가 GI.-Ep.에 비해 약 2.66배 크기 때문이며 이는 변장비가 작을수록 좌굴하중의 큰 증가를 가져온다.

3.2.2 패칭두께의 영향

3.2.1의 결과에 기초하여 본 절에서는 강제 보강판의 좌굴 능력과 동등 또는 그 이상의 좌굴능력을 갖기 위한 패칭의 두께를 알아보았다.

그림 4와 그림 5는 각각 GI.-Ep.와 Gr.-Ep. 복합재료로 패칭한 경우 패칭 두께 변화에 대한 무차원 좌굴하중의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, t_f 는 페이스의 두께(복합재료 두께), t_c 는 코아의 두께(강제 판 두께)를 의미한다. 그림 5와 그림 6에서 알 수 있듯이 변장비가 1.0 이상의 경우에 대해 페이스의 두께가 코아의 1.2배 이상이 되어야 강제 보강판의 좌굴능력이상을 발휘할 수 있다.

그런데 변장비가 1.0이하에서는 강제 보강판은 도로교 설계기준(2003)의 최소단면적과 최소단면2차모멘트 규정을 따르는 경우라도 식 (1)의 종방향 보강재 소요장비가 매우 크게 규정(30이상)되어 있기 때문에 변장비(a/b)변화에 따라 값의 변화가 거의 없다. 반면에 복합재료로 패칭했을 때 변장비가 1.0 이하에서 좌굴하중이 크게 상승한다.

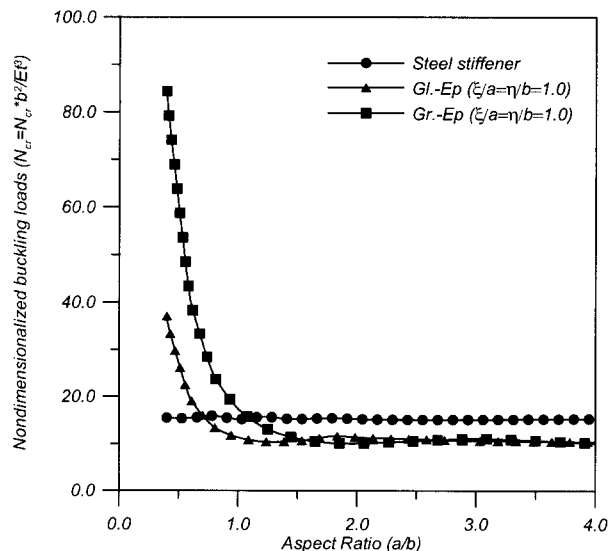


그림 4. 복합재료로 패칭된 변단면 판과 종방향으로 한 개의 강제 보강재를 갖는 판의 무차원 좌굴하중 비교

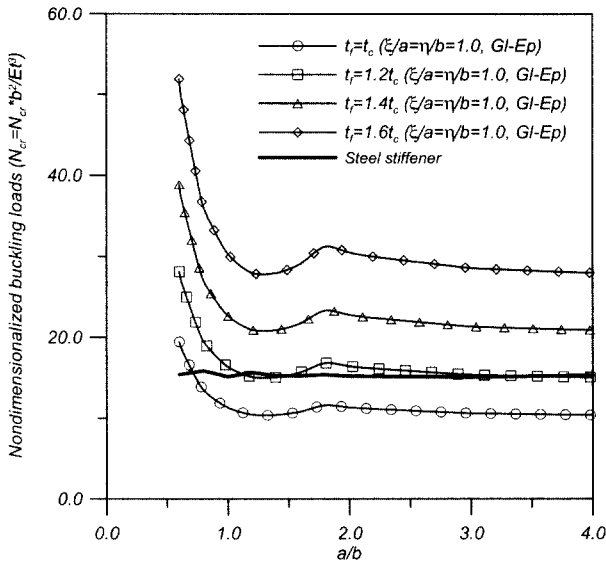


그림 5. Gl.-Ep. 복합재료로 패칭된 판의 패칭 두께 변화에 따른 무차원 좌굴하중($\xi/a = \eta/b = 1.0$)

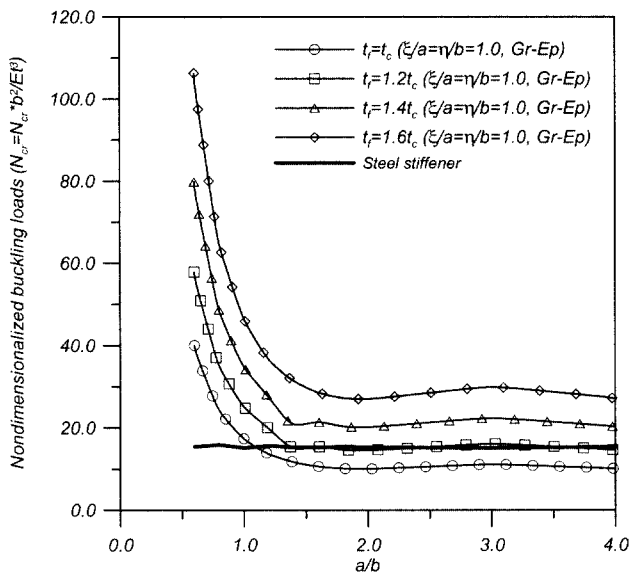


그림 6. Gr.-Ep. 복합재료로 패칭된 판의 패칭 두께 변화에 따른 무차원 좌굴하중($\xi/a = \eta/b = 1.0$)

3.2.3 패칭 면적비의 영향

3.2.1과 3.2.2에서는 복합재료 패칭 면적비($\xi/a, \eta/b$)가 1.0인 경우이며 본 절에서는 패칭 면적비가 일정하지 않고 길이와 폭 방향으로 일정하게 줄어드는 경우 무차원 좌굴하중의 변화를 살펴보았다.

그림 7은 Gl.-Ep.와 Gr.-Ep.로 패칭된 경우 극단적인 두 가지 경우를 비교한 것이다. 즉, 면적비가 1.0과 0.5를 비교한 것인데 면적비가 1.0인 경우에 두 재료는 1방향 탄성계수 (E_1)의 영향을 받아 좌굴하중에 차이를 보이지만 면적비가 0.5인 경우에는 1방향 탄성계수가 크더라도 좌굴하중의 증가

에 기여하지 못함을 알 수 있다. 또 다른 특징은 변장비가 1.5이상에서부터는 재료의 1방향 탄성계수가 크더라도 좌굴하중에는 큰 증가가 없다는 것이다.

그림 8은 Gr.-Ep. 복합재료로 패칭된 면적이 x 방향과 y 방향으로 일정하게 줄어들고 변장비의 대표적인 몇 가지 경우에 대한 무차원 좌굴하중을 나타낸 것이다. 그림 8에서 변장비(a/b)가 작은 경우에 패칭된 면적이 줄어들어 따라 좌굴하중의 감소가 뚜렷하게 나타나며 변장비가 커질수록 좌굴하중의 감소경향은 둔화된다. 특히 변장비가 작은 경우는 패칭 면적 비($\xi/a, \eta/b$)가 0.9이하에서부터 좌굴하중의 급격한 감소 경향이 나타나며 0.9까지는 좌굴하중의 감소는 크지 않았으며 약 4.6%의 감소를 보였다.

3.2.4 스트립형태로 패칭한 경우

본 절에서는 3.2.3절과는 다르게 x 와 y 방향으로 같은 비율로 복합재료 패칭 면적이 줄어드는 것이 아니라 x 방향(압축하중 작용방향)으로는 면적비가 고정되며 y 방향(압축하중 작용 직각방향)으로만 면적비가 줄어드는 경우이다. 즉, 스트립의 형태로 복합재료는 패칭된다. 이에 대한 결과를 강제 보강판의 무차원 좌굴하중과 비교하여 그림 9에 나타내었다.

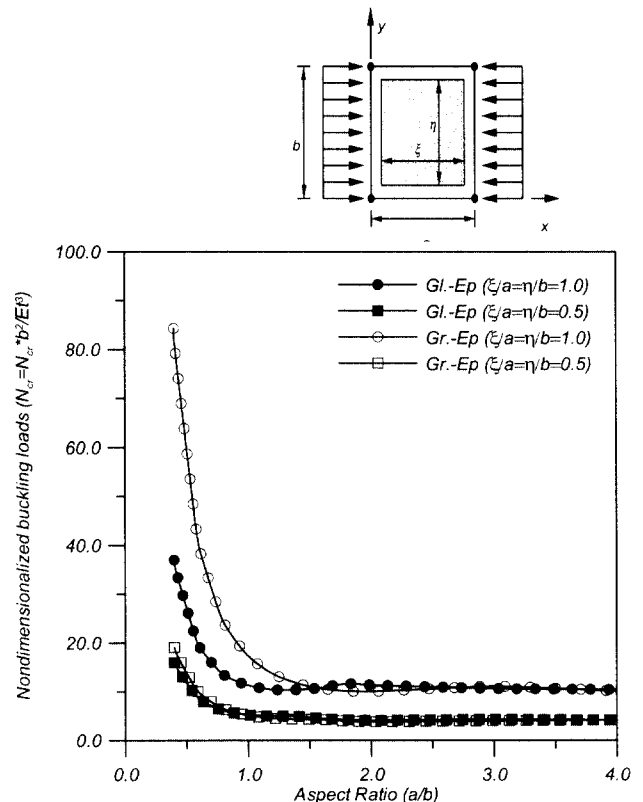


그림 7. 두 개의 다른 복합재료로 패칭된 변단면 판의 패칭 면적 변화에 따른 무차원 좌굴하중

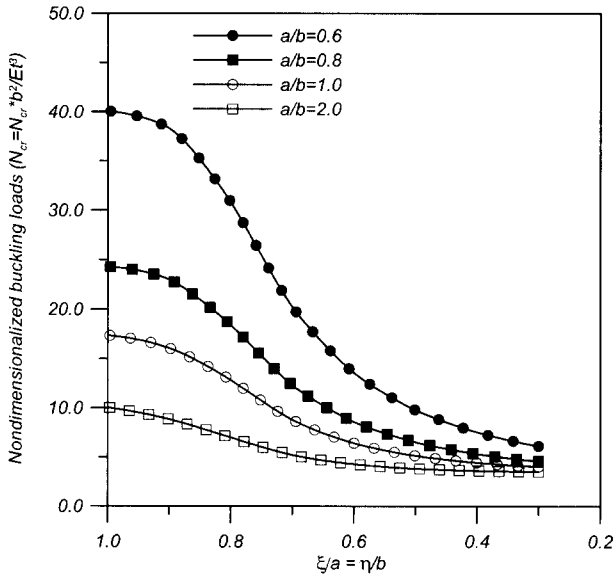
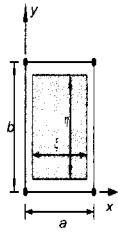


그림 8. Gr.-Ep. 복합재료로 패칭된 변단면 판의 패칭 면적비 변화에 따른 무차원 좌굴하중

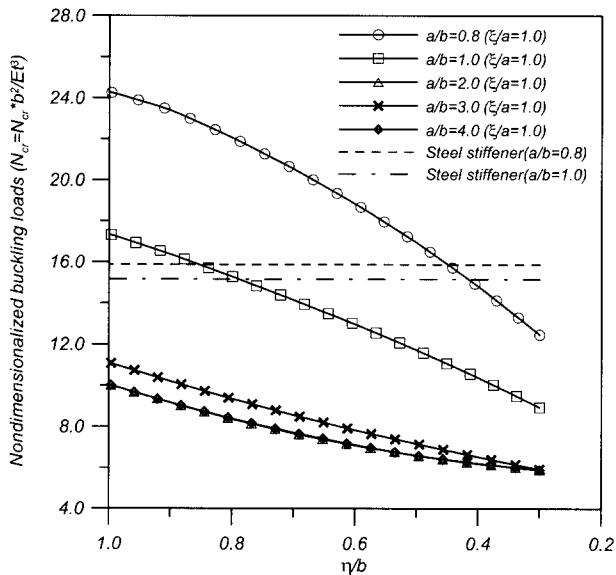


그림 9. Gr.-Ep. 복합재료를 스트립형태로 패칭한 변단면 판의 패칭 면적 변화에 따른 무차원 좌굴하중($\xi/a = 1.0$)

그림 9에서 변장비가 0.8인 경우 스트립으로 복합재료를 패칭한 경우 y 방향 면적비(η/b)가 약 0.45이상에서 강재 보강판보다 큰 좌굴하중을 보였으며 변장비가 1.0인 경우는 y 방향 면적비(η/b)가 약 0.85이상에서 강재 보강판에 비해

큰 좌굴하중 값을 나타내었다. 이는 변장비(a/b)가 작은 경우 복합재료를 전 면적에 패칭할 필요 없이 스트립으로 패칭하여도 좌굴하중의 증가를 가져오며 변장비가 큰 경우($a/b > 1.0$)에는 스트립 형태의 패칭은 큰 효과가 없음을 보여준다.

3.2.5 패칭되는 복합재료 적층배열 및 보강각도의 영향

패칭되는 복합재료는 여러 가지 적층배열 및 섬유 보강각도를 가질 수 있다. 여기서 적층배열에 있어 패칭되는 복합재료(페이스)는 2층으로 하였으며 복합재료 구성에 사용되는 섬유의 보강각도는 30, 45, 90, 0의 형태로 구성하였다.

본 절에서는 이렇게 패칭되는 복합재료의 적층배열 및 보강각도 변화에 따른 무차원 좌굴하중의 경향을 살펴보았다.

먼저 그림 10과 그림 11은 각각 Gl.-Ep.와 Gr.-Ep. 복합재료로 패칭되고 적층형식이 0/Core/0으로 배열된 경우와 0/90/Core/90/0으로 배열된 경우를 변장비 및 패칭 두께 변화에 따른 무차원 좌굴하중을 비교한 것이다. 여기서 0은 압축하중을 받는 방향으로 섬유가 보강된 경우이며 90은 압축하중의 직각방향으로 섬유가 보강된 것이다(그림 10). 또한 여기서 Core는 강판을 의미한다.

그림 11, 12에서 변장비가 0.8이하에서는 적층배열의 영향을 거의 받지 않으며 0.8이상부터는 0/90/Core/90/0으로 보강을 한 것이 좌굴하중의 증가를 보였다. 또한 패칭 두께가 두꺼워 질수록 적층배열에 의한 영향이 더욱 커지며 좌굴하중의 증가를 보였다.

그림 13은 적층배열이 같은 경우에 보강각도 변화에 따른 무차원 좌굴하중의 영향을 나타낸 것이다. 변장비가 약 0.8이상에서 보강각도가 45/-45/Core/-45/45인 경우에 좌굴하중이 가장 크게 나타났으나 변장비가 0.8이하에서는 30/-30/Core/-30/30인 경우가 가장 큰 좌굴하중을 보였다.

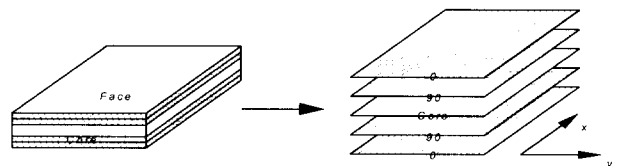


그림 10. 복합재료의 적층배열 및 보강방향

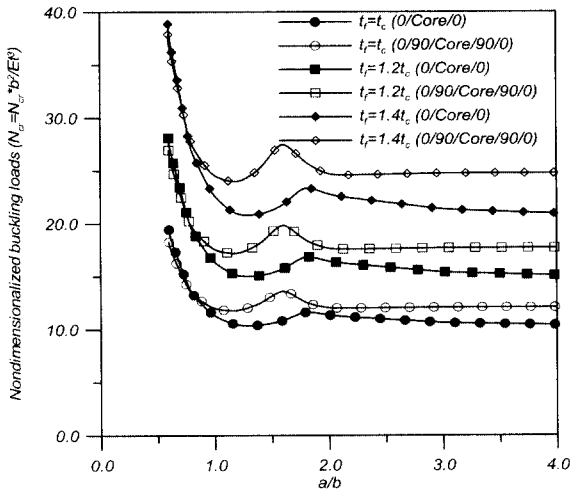


그림 11. Gl.-Ep. 복합재료로 패칭된 판의 복합재료 적층배열의 변화에 따른 무차원 좌굴하중($\xi/a = \eta/b = 1.0$)

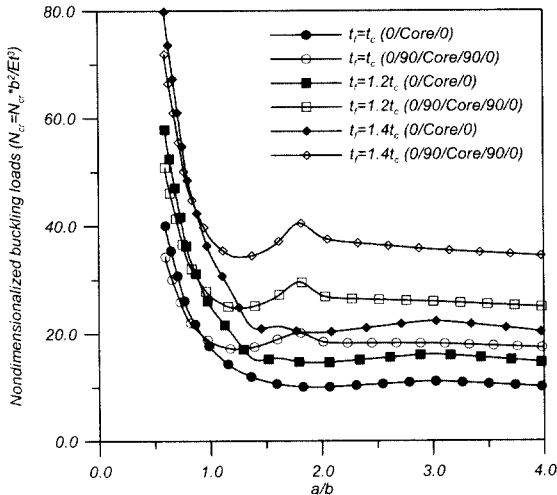


그림 12. Gr.-Ep. 복합재료로 패칭된 판의 복합재료 적층배열의 변화에 따른 무차원 좌굴하중($\xi/a = \eta/b = 1.0$)

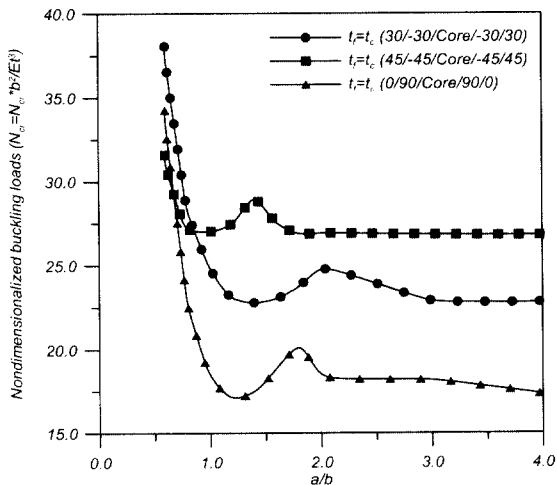


그림 13. Gr.-Ep. 복합재료로 패칭된 판의 복합재료 보강각도 변화에 따른 무차원 좌굴하중($\xi/a = \eta/b = 1.0$)

4. 결 론

본 연구에서는 보강판의 보강재를 복합재료로 대체하는 새로운 개념을 소개하고 복합재료로 대체시 발생하는 비등방성과 변단면의 특성을 보이는 판의 좌굴거동 특성을 알아보기 위해 여러 가지 매개변수를 변화시켜 유한요소 해석을 수행하였다. 여러 가지 매개변수 해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Gl.-Ep.와 Gr.-Ep. 복합재료로 패칭한 판과 기존의 강재 보강재로 구성된 보강판의 좌굴하중을 비교한 결과 변장비(a/b)가 작은 경우에는 복합재료 패칭에 의한 좌굴하중이 크게 나타났으나 변장비(a/b)가 큰 경우에는 강재 보강재에 의한 좌굴하중이 더욱 크게 나타났다.
- (2) Gl.-Ep.와 Gr.-Ep. 복합재료로 패칭한 경우 변장비에 변화에 따라 강재 보강재로 구성된 보강판의 좌굴하중 강도이상을 가지려면 최소한 보강된 판의 1.2배 이상의 두께로 복합재료를 패칭하여야 한다.
- (3) 복합재료로 패칭한 면적비의 영향을 살펴보면 일정하게 면적이 줄어드는 경우에는 패칭 면적이 10% 줄어들어도 좌굴하중은 크게 감소하지 않으며 변장비가 커질수록 좌굴하중의 감소는 더욱 적어진다. 한편 패칭 면적이 한쪽 방향으로만 줄어드는 경우, 즉 스트립형태로 패칭한 경우에는 변장비가 작을 경우 ($a/b \leq 0.8$)에는 스트립형태로 배치하여도 기존 강재 보강판에 비해 좌굴하중이 크게 나타나지만 변장비가 0.8보다 큰 경우에는 스트립형태의 배치는 좌굴하중의 증가를 보이지 않았다.
- (4) 패칭된 복합재료의 적층배열 및 보강각도 변화에 따른 좌굴하중의 결과를 살펴보면 변장비가 0.8이상에서부터 적층배열이 0/90/Core/90/0인 경우 좌굴하중은 상승하며 패칭 두께가 두꺼워질수록 좌굴하중의 상승 폭은 더욱 크다. 또한 보강각도가 45/-45/Core/-45/45로 배열된 경우에 좌굴하중에 가장 유리함을 알 수 있다.
- (5) 이상으로 여러 가지 매개변수 변화를 통해 살펴본 단순지지된 비등방성 변단면 판의 좌굴거동 특성은 기존의 강재 보강판을 대체할 수 있을 것으로 판단되며 실험을 통한 검증이 필요하다. 또한 본 연구에서 제시한 개념은 단지 양연지지된 보강판에만 국한되어 적용되는 것이 아니라 앞으로 플레이트 거더나 강박스 교량의 웨브의 좌굴방지를 목적으로 설치되는 종방향 보강

재를 복합재료로 대체 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

- 박대용, 장석운(2003) 단순지지된 변단면 복합 적층판의 좌굴 해석, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, pp. 296-303
- 대한토목학회(2003) 도로교 설계기준·해설
- LUSAS 13.5 (2004) Finite Element Analysis System, Theory & Example Manual, Finite Element Analysis Ltd., London.
- Reddy, J. N. (1997) Mechanics of laminated

composite plates : Theory and Analysis, CRC Press.

- Srivastava, A.K.L., Datta, P. K., and Sheikh, A. H. (2003) Buckling and vibration of stiffened plates subjected to partial edge loading. *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol. 45, pp. 73-93.
- Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1963) Theory of elastic stability, McGraw-Hill, International editions

(접수일자 : 2004.6. 22 / 심사일 2004. 7. 23 /
심사완료일 2004. 8. 23)