

보강된 복합적층 패널의 좌굴 및 좌굴후 거동의 형상 최적설계에 관한 연구

이광록* · 정기현** · 허성필** · 양원호*** · 조명래****
(2000년 4월 19일 접수)

A Study on Shape Optimization for Buckling and Postbuckling Behavior of Stiffened Laminated Composite Panels

Kwang-Rock Lee, Ki-Hyun Chung, Sung-Pil Heo,
Won-Ho Yang and Myung-Rae Cho

Key Words: Composite(복합재료), Buckling Load(좌굴 강도), Postbuckling Behavior(좌굴후 거동), Failure Load(파손 강도), Optimization(최적화)

Abstract

In this study, a shape optimization of stiffener was conducted to increase buckling load or failure load in each case with a different design value and a different objective function for stiffened laminated composite panel of I-type under compression loading. Regarding each of buckling load or failure load as objective function, optimum design was carried out. In respect of optimum design, the effects of relative length of web and cab of stiffener on buckling load or failure load of postbuckling were investigated.

1. 서 론

최근 신소재의 개발과 더불어 복합재료의 개발이 급속하게 이루어지고 있다. 섬유강화 복합재료는 기존의 금속 재료에 비하여 비강성(specific strength) 및 피로 특성(fatigue characteristic) 등의 기계적 성질이 양호하고, 이방성(anisotropy)을 이용하여 사용자의 요구 조건에 적합한 구성요소를 설계, 제작할 수 있다는 장점 때문에 항공우주 산업 분야에서 많이 사용되고 있는 첨단 신소재이다. 이러한 복합재료는 구조물의 경량화 및 효율성의 측면에서 항공기나 자동차에 많이 쓰인다. 특히 구조물을 구성하고 있는 스킨(skin)은 셸

(shell)이나 평판의 형태를 갖는데 이러한 구조요소(structural element)는 재료자체의 정적강도(static strength)에 비해 상대적으로 낮은 좌굴응력(buckling stress)을 갖는 특징이 있다. 보(beam)나 평판(plate), 보강된 평판(flat stiffened panel)의 경우는 좌굴이 발생하더라도 좌굴후에 지지하중의 감소가 없는 안정 좌굴을 보인다. 따라서 좌굴이 항상 구조물의 최종파손(ultimate failure)을 의미하는 것은 아니므로, 구조물을 경량화 하는 효율적인 설계를 위해 부분적인 좌굴을 허용한다. 이러한 셸이나 평판에 섬유강화복합재료(fiber reinforced composite material)가 많이 사용되고 있으며, 이는 등방성의 패널과는 달리 보강섬유의 방향(fiber orientation)이나 적층순서(stacking sequence)의 변화에 의해서 구조물의 유효강성(effective modulus)이나 강도를 변화시킬 수 있다. 따라서 적절한 적층의 선택에 의해 좌굴에 대한 구조물의 저항능력을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 필요에 알맞은 특성을 갖도록 최적 설계를 할 수 있게 된다. 그래서 복합적층판의 좌굴하중을

* 성균관대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

E-mail : khchung@nature.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7496 FAX : (031)290-5849

*** 회원, 성균관대학교 기계공학과

**** 회원, 인덕대학 기계설계학과

최대화시키기 위한 적층순서 및 적층두께(layer thickness)의 최적화(optimization)에 관한 연구도 다양하게 진행되고 있다.^(1,2)

실제로 사용되는 구조물에서 경계조건이나 곡률반경 또는 재료의 변경은 쉽지 않음을 고려할 때 복합재료의 사용은 등방성 재료에 비해 구조물의 설계를 더 효율적으로 할 수 있게 해준다.

본 연구에서는 보강된 복합적층패널의 효율적이고 안전한 설계를 위하여 웹(web), 캡(cab) 및 두께(thickness) 등의 중요한 인자들에 대해 연구를 수행한 후, 이들 인자들을 고려한 최적 설계를 통해 좌굴강도 및 좌굴후 파손강도를 향상시키고자 한다. 그리고 이러한 인자들의 특성들을 고찰하고자 한다.

2. 유한요소해석 및 검증

2.1 해석모델의 정의

본 연구에서는 기존의 연구⁽³⁾에 제시된 해석결과를 검증하고 이 모델에 대해 보강재의 형상을 최적화 하고자 한다. 해석모델은 Fig. 1과 같이 일축압축하중을 받는 복합적층패널이며, 패널의 한 단층의 두께는 0.125mm이고 표피(skin)는 8개의 플라이(ply), 보강재를 구성하고 있는 캡(cab), 웹(web), 플랜지(flange)는 각각 10개의 플라이(ply)로 구성되어 있다. 적층각은 Table 1과 같이 스킨(skin)은 준등방성 적층인 $[0/90/\pm 45]_s$, 보강재는 $[0/90/45/0/-45]_s$ 인 경우에 대하여 해석하였다. 여기서 적층각(θ)는 하중축에서 반시계 방향으로의 회전을 양(+), 각도로 정의하였다. 기존의 연구⁽³⁾에 근거하여 요소망을 구성하였으며, 재료의 물성치는 Table 2와 같다. 패널의 치수는 Fig. 2에 나타난 것과 같고, 초기좌굴 모드가 길이 방향으로 세 개의 사인(sine)반파장을 나타내도록 하였다. 이때 사용된 총 절점수는 1405개, 총 요소수는 440개이다.

2.2 유한요소해석 방법

Fig. 1의 경계조건을 따르는 보강된 복합적층패널에 대해서 8절점 쉘 요소로 유한요소망을 구성하였다. 하중은 작용면에 동일 변위가 발생하도록 압축력을 작용시켜 고유치해석(eigenvalue analysis)을 통해 좌굴하중(buckling load: P_{cr})을 구했다. 좌굴후 파손평가를 위해 비선형 유한요소

해석을 수행하였고, 각 단계에서 Tsai-Hill의 파손이론을 적용하였다. 비선형 해석을 위해 초기결함은 1차 좌굴모드 형태에, 크기는 스킨판재 두께의 10%로 취하였다. 또한 좌굴후 거동특성을 알아보기 위해 각 변수에 대한 경향을 분석하였다.

해석에 사용되는 유한요소 프로그램으로 pre-processor는 MSC/PATRAN 7.0을 사용하였고 해석 및 post-processor는 ABAQUS 5.8을 사용하였다.

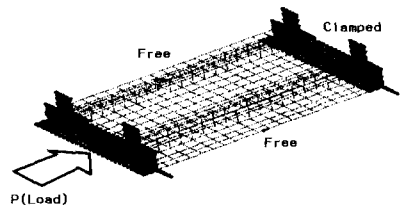


Fig. 1 Boundary condition and load condition of reference model

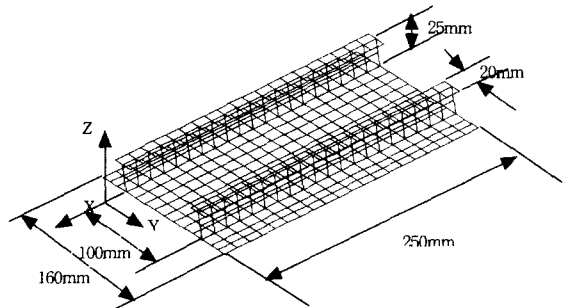


Fig. 2 Geometry of stiffened composite panel and finite element mesh

Table 1 Stacking sequence of stiffened flat panel for comparison

Part	Stacking sequence
Skin	$[0/90/\pm 45]_s$
Stiffener cap	$[0/90/45/0/-45]_s$
Stiffener web	$[0/90/45/0/-45]_s$
Stiffener flange	$[0/90/45/0/-45]_s$

Table 2 Material properties of HFG CU-125NS graphite/epoxy composite material⁽³⁾

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	130.0 GPa
Elastic moduli in transverse directions	E_2, E_3	10.0 GPa
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes	G_{12}, G_{13}	4.85 GPa
Shear modulus in 2-3 Plane	G_{23}	3.62 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}, ν_{13}	0.31
	ν_{23}	0.52
Tensile strength in fiber-direction	X_T	1933 MPa
Compressive strength in fiber-direction	X_c	1051 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y_T	51 MPa
Compressive strength in transverse direction	Y_c	141 MPa
Shear strength	S	61 MPa

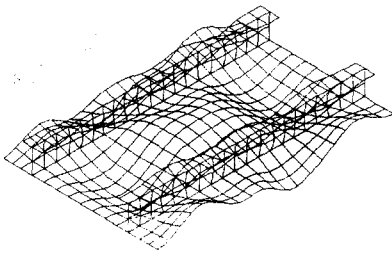


Fig. 3 Deformed shape of postbuckling analysis

2.3 해석결과 검증

일반적으로 보강된 패널의 경우, 보강재가 스킨의 두께보다 두껍고 폭이 좁기 때문에 주로 스킨에서 좌굴이 발생한다. 따라서 보강재가 작용 하중을 얼마만큼 분담하느냐는 구조물의 좌굴 거동과 좌굴 후 거동에 중요한 요소이다. 이러한 좌굴에 영향을 주는 보강재의 요소는 보강재의 크기, 형상, 보강재의 두께, 보강재의 섬유방향 등이다. 보강된 패널은 평판과 달리 기하학적 형상의 영향으로 인하여 면내하중만 가해져도 양 끝단에서 굽힘모멘트가 발생한다. 이로 인해 하중의 초기 단계에서부터 보강재가 있는 면의 반대 방향으로 횡변위가 발생하여, 보강재 사이에서 그 방향으로 볼록한 모양의 변형이 발생한다. Fig. 3는 비선형 해석에 의해 파손으로 평가되었을 때의 변형된 형상을 나타내고 있다. Fig. 4는 보강재 캡(cab)의 너비가 20mm인 경우에 축방향 변위(u)와 축방향 압축 하중(P)의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 기존의 연구결과⁽³⁾와 본 연구결과가 약 5% 이내의 오차범위에서 잘 일치하고 있다. Fig. 5는 하중과 패널의 중앙 점에서 면외방향 변위와의 관계를 나타낸다.

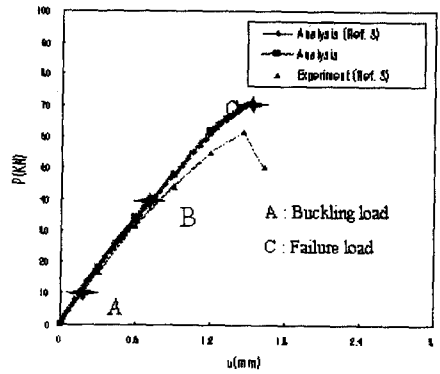


Fig. 4 Comparison of verification results and analysis result of load-shortening curve

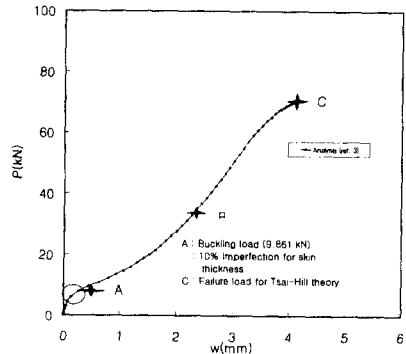


Fig. 5 Analysis result of load deflection curve

3. 보강재의 최적 형상 결정

3.1 최적설계 문제의 정의

보강된 복합적층패널의 좌굴은 표피(skin)에서 일어나기 때문에 좌굴 및 좌굴 후 강도를 증가시키려면 표피의 섬유적층각이나 두께를 바꿈으로써 가능하지만, 이방성을 갖는 섬유적층각은 좌굴모드에 따른 에너지 집중을 유발하고 이에 따라 에너지 분산의 차원에서 준등방성 대칭적층을 많이 사용하게 된다. 그래서 표피의 섬유각은 제약을 받게되고 두께 또한 경량화에 영향을 주기 때문에 늘릴 수만은 없다. 따라서 보강된 구조물의 좌굴강도 및 좌굴 후 강도를 증가시키기 위해서는 보강재의 형상이나 섬유적층각을 바꿔주는 것이 적절하다. 이와 관련된 연구는 여러 사람에

의해 수행되어 왔고, 그 중 Dickson 등⁽⁸⁾은 I-형, J-형, Z-형, C-형의 보강재로 보강된 패널의 좌굴 하중을 비교하여 I-형이 제일 크다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 보강재의 기본 형상을 I-형으로 사용하여 캡(cab)과 웹(web)의 길이를 바꿈으로써 좌굴강도 및 좌굴후 강도(P_{T-H})에 대해 최적의 형상을 찾고자 한다.

3.2 목적 함수 및 설계 구속조건

최적설계는 고유치해석 결과의 최적설계와 비선형해석 결과의 최적설계로 나누어 수행하였다. 고유치해석 최적설계의 목적함수는 좌굴강도이고, 비선형해석 최적설계의 목적함수는 Tsai-Hill의 파손이론⁽⁹⁾에 근거한 좌굴후 파손강도(P_{T-H})이다. 구속조건(constraint)은 체적을 구속하고 좌굴강도와 파손강도를 최대화시키는 안전설계 측면에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 이 구속건의 의미는 제한된 보강재의 형상에서 최대의 좌굴강도나 좌굴후 파손강도(P_{T-H})를 갖는 I-형의 보강재 형상을 구하는 것이다.

3.3 설계변수(design variable)

좌굴강도 및 좌굴후 강도에 대한 최적설계를 설계변수(design variable)를 달리하여 네 가지 경우로 나누어 수행하였다. Case1-1은 캡의 길이에 대해서 좌굴강도의 최적설계를 수행한 경우를 나타낸다. Case1-2는 캡과 웹의 길이 및 두께에 대해서 좌굴강도의 최적설계를 수행한 경우이다. Case2-1과 Case2-2는 각각의 Case1-1과 1-2와 동일한 설계변수에 대해 좌굴후 파손강도의 최적설계를 수행한 경우이다.

3.4 최적화 방법

좌굴강도에 대한 최적설계에서는 유한요소해석을 통한 고유치해석에서 좌굴강도를 구하고 이 값을 목적함수로 하여 최적설계를 수행하였다.

Table 3 Algorithms used in optimization

Strategy	Augmented Lagrange Multiplier Method
Optimizer	Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shamo Method
One-dimensional search algorithm	Golden Section Method

좌굴후 파손강도에 대한 최적설계에서 Case 2-1은 캡의 길이에 따른 P_{T-H} 를 구하고 이것을 다항식으로 곡선적합(curve fitting)하여 목적함수인 좌굴후 파손강도의 예측식을 구성하고 이 예측식을 이용하여 최적설계를 수행하였다. Case 2-2에서는 몇 가지 설계변수에 대해 비선형해석으로 좌굴후 강도를 구하고 이 사이의 값은 2차원-3차 보간함수(bi-cubic interpolation)를 이용하여 구하였다. 최적설계의 수행에서 사용한 알고리즘들은 Table 3과 같다.

3.5 문제의 정식화

3.5.1 좌굴강도의 최적화

Case 1-1

$$\underset{\vec{x}}{\text{Minimize}} -P_{cr}(c, h)$$

subject to

$$c + h = 45 \quad t = 1.25 \quad \Rightarrow \text{Volume constant}$$

$$\vec{x}'_i < \vec{x}_i < \vec{x}''_i$$

Case 1-2

$$\underset{\vec{x}}{\text{Minimize}} -P_{cr}(c, h, t)$$

subject to

$$t*(c + h) = 56.25 \quad \Rightarrow \text{Volume constant}$$

$$h = \frac{56.25}{t} - c > 0$$

$$\vec{x}'_i < \vec{x}_i < \vec{x}''_i$$

3.5.2 좌굴후 강도의 최적화

Case 2-1

$$\underset{\vec{x}}{\text{Minimize}} F_{T-H}(c, h); \frac{\sigma_1^2}{s_L^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{s_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{s_T^2} + \frac{r_{12}^2}{s_{LT}^2}$$

subject to

$$c + h = 45 \quad t = 1.25 \quad \Rightarrow \text{Volume constant}$$

$$\vec{x}'_i < \vec{x}_i < \vec{x}''_i$$

Case 2-2

$$\text{Minimize } F_{T-H}(c, h, t) ; \frac{\sigma_1^2}{s_L^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{s_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{s_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{s_{LT}^2}$$

subject to

$$t*(c + h) = 56.25 \Rightarrow \text{Volume constant}$$

$$h = \frac{56.25}{t} - c > 0$$

$$\vec{x}^l_i < \vec{x}_i < \vec{x}^u_i$$

여기서, s_L 은 길이방향인장강도(longitudinal tensile strength), s_T 는 횡방향인장강도(transverse tensile strength)이며, s_{LT} 는 면내전단강도(in-plane shear strength)를 나타낸다.

3.6 최적설계 순서도

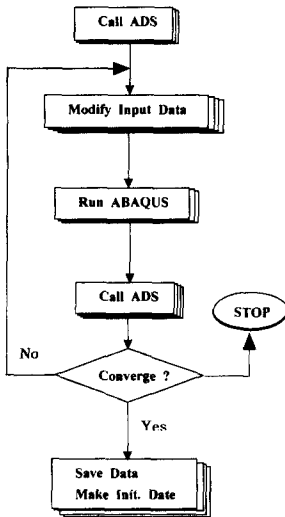


Fig. 6 Flowchart for optimization

3.7 최적화 결과

3.7.1 Case 1-1의 최적설계

Case 1-1의 목적함수는 좌굴강도이고 설계변수는 웹과 캡의 길이이다. 이 때 보강재의 두께가 1.25mm이고, 캡과 웹의 길이의 합이 일정하다고 가정하여 최적설계를 수행하였다. 이 가정은 보강재의 체적이 일정한 상태에서 좌굴강도를 최대로 만들어 주는 보강재의 최적형상을 구하기 위

한 것이다. 최적화하기 전에 Fig. 7과 같이 캡의 길이(c)와 웹의 길이(h)의 변화에 따른 경향을 살펴보았다. 캡의 길이가 증가할수록 보강된 복합적층패널의 좌굴강도는 증가함을 알 수 있었다. 최적설계 결과도 c가 38.72mm이고 h는 6.276mm로 구해졌는데 이는 Fig. 7의 파라미터(c, h) 변화 경향과 잘 일치한다. 이로써 두께가 일정하고 c과 h의 길이의 합이 일정하면, 좌굴강도에 대해서는 c가 h보다 더 중요한 변수가 된다. c가 h의 약 6배 정도로 클 때 좌굴강도가 최대가 된다.

3.7.2 Case 2-1의 최적설계

Case 2-1의 목적함수는 좌굴후 파손강도이다. 이 파손강도는 비선형해석의 각 단계에서 계산된 주응력을 Tsai-Hill이 제안한 파손기준식에 대입하여 계산된 값을 파손지수로 설정하고, 패널 각 절점의 모든 단면위치(section point)값이 파손지수인 1을 초과한 경우를 파손으로 평가하였다. Tsai-Hill 파손이론은 응력간에 실제적으로 서로 영향을 미치며, 이러한 응력간의 영향을 고려하였다. 이 파손이론은 일반적으로 복합재료 파괴를 예측하는데 응용범위가 넓으나, $\sigma_1\sigma_2$ 항의 분모가 X'만의 항으로 표현되는 문제점을 가진다.

이 경우 목적함수가 비선형 해석을 통하여 구해지기 때문에 함수값을 계산(function evaluation)하는데 많은 시간이 걸린다. 또한 이러한 해석을 수차례 반복 해석하여야 하기 때문에 최적화를 수행하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 그러한 어려움을 해결하기 위해 먼저 Fig. 8과 같이 일정한 간격의 변수값에 대해 해석하고 그 값들을 Fig. 9와 같이 최소자승법에 의해 다항식으로 곡선적합하여 함수식을 찾아낸다. 이 함수식을 통해 변수가 변할 때 목적함수값을 구한다. 이와 같은 방법으로 최적화 한 결과, 캡의 길이(c)는 9.821mm, 웹의 길이(h)는 35.18mm로 계산되었다. 이 경우에는 c보다 h의 길이가 3.6배정도 더 큰 형상이 나왔다. 좌굴후 거동 특성인 파손강도를 최적화하는데 c보다는 h의 길이가 더 길어야 됨을 알 수 있었다. Fig. 10의 왼쪽 종축 좌표는 형상비(aspect ratio)에 따른 파손강도를 최적화하기 전의 파손강도로 나누어 무차원시킨 값이고, 오른쪽 종축 좌표는 좌굴강도(P_c)로 무차원시킨 값이다. 이 그래프에서 최적화된 형상의 좌굴후 파손강도가 최적화되기 전에 비해 1.5배가

항상되었고, 좌굴강도(P_{cr})에 대해서는 10배의 하중 지지능력이 있음을 보여주고 있다.

3.7.3 Case 1-2의 최적설계

Case 1-2의 목적함수는 좌굴강도이며, 설계변수는 보강재의 두께(t)와 캡의 길이(c), 웹의 길이(h)로 설정하였다. 설계변수에 대한 경향을 Fig. 11에 나타내었다. 이 경우에도 체적이 일정하다는 조건, $t \times (c+h)=56.25$ 와 h 가 0보다 크다는 조건을 제한조건으로 사용하였다. 여기서 보강재의 두께가 커지면 체적일정이라는 조건에 의해 c 와 h 의 합이 작아지게 된다. 따라서 목적함수에 대해 3가지 변수들이 상관관계를 가지고 있고, 어떤 변수가 커지면 나머지 변수들은 작아지게 되는 특성을 갖는다. 최적화 결과는 c 는 14.02mm, h 는 10.90mm, t 는 2.258mm로 구해졌다. 이는 보강재의 두께가 원래의 두께인 1.25mm보다는 더 커야 됨을 나타내고 있고 이는 I-형 보강재에서는 두께도 좌굴강도에 중요한 설계변수임을 나타내는 것이다. 이 경우에서도 좌굴강도에 대한 최적설계이기 때문에 결과값이 h 의 길이보다는 c 의 길이가 더 크게 나왔다. 이로써 Case 1-1에서와 같이 c 의 길이가 h 보다는 더 커야 좌굴강도가 우수하다는 사실을 알게 되었다. Fig. 12는 설계변수인 캡의 길이와 보강재의 두께가 최적화 되는 과정에서의 변화를 나타내는 그래프이다.

3.7.4 Case 2-2의 최적설계

Case 2-2의 목적함수는 좌굴후 파손강도(Tsai-Hill)이다. 설계변수는 보강재의 두께(t), 캡의 길이(c), 웹의 길이(h)이고, 조건은 체적일정이며, h 가 0보다 크다는 것을 제한조건으로 가지고 있다. 이 문제의 최적설계도 목적함수가 비선형해석을 통해 계산되기 때문에 3개의 설계변수에 대해 일정하게 변수값을 증가시키면서 목적함수를 계산하고, 그 사이 값들은 범용 프로그램인 Matlab의 2차원-3차 보간함수(bi-cubic interpolation)를 이용하여 구한 다음 이 값들을 최적화 알고리즘을 통해 최적화 하였다. Fig. 13은 그 값을 3차원 그래프로 나타내었고, Fig. 14는 함수값을 등고선 형태로 나타낸 그래프이다. 최적설계 결과값은 c 는 10.24mm, h 는 13.39mm, t 는 2.38mm로 구해졌다. 이 경우 최적화된 형상의 파손강도가 원래 모델의 파손강도보다 1.78배 더 크게 나왔

고, 좌굴강도보다 13배 더 큰 하중지지능력이 있는 것으로 나타났다. 또한 보강재의 형상에 있어서는 두께가 두꺼워졌고, Case 1-2의 경우와 같이 파손강도의 최적설계이기 때문에 h 가 c 의 길이보다 상대적으로 더 크게 나왔다. 이로써 h 가 c 의 길이보다 더 커야 파손강도가 우수하다는 것을 알 수 있었다. 즉 캡의 길이가 좌굴강도의 최적화에는 큰 영향을 미치고 파손강도의 최적화에는 웹의 길이가 큰 영향을 미치는 것이라고 생각된다. Fig. 15는 설계변수인 캡의 길이와 보강재의 두께가 최적화되는 동안에 변화하는 것을 나타낸 것이다.

3.7.5 보강재의 부피를 증가시키면서 좌굴강도를 최적화시킬 경우 보강재의 형상변화

Fig. 16에서와 같이 보강재의 부피를 증가시키면서 최적화를 시켰을 때, 보강재의 형상을 구성하는 캡과 웹의 길이의 합은 일정하게 유지되며 보강재의 두께가 증가되는 것을 볼 수 있다. 따라서 좌굴강도를 늘리기 위해서는 캡과 웹의 길이를 무한히 늘리는 것보다 두께를 늘려야 더 효과적이라는 것을 알 수 있다. Fig. 17에서는 좌굴강도를 높이기 위하여 보강재의 부피를 늘리면서 최적설계를 수행했을 때, 보강재의 부피증가에 따르는 최적형상의 변화는 보강재의 두께와 웹의 길이는 증가하며 캡의 길이는 감소한다. Fig. 18은 좌굴강도에 대한 보강재의 최적형상이고, Fig. 19는 좌굴후 파손강도에 대한 보강재의 최적형상을 나타낸 것이다.

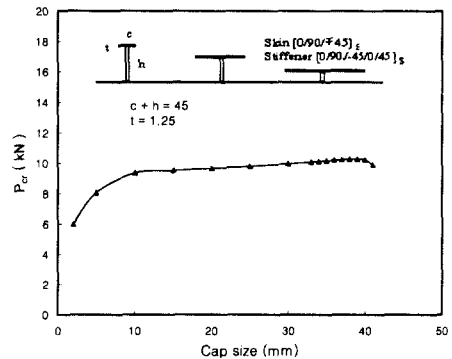


Fig. 7 Buckling load of eigenvalues analysis for variation of cap size (Effect of buckling load for stiffener shape)

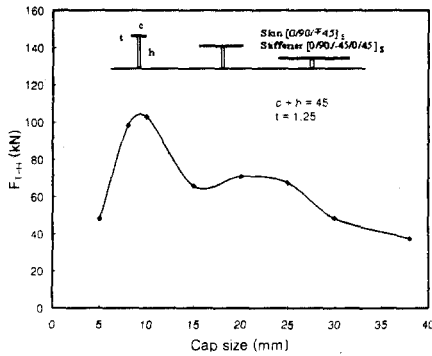


Fig. 8 Failure load of nonlinear analysis for variation of cap size (Effect of failure load for stiffener shape)

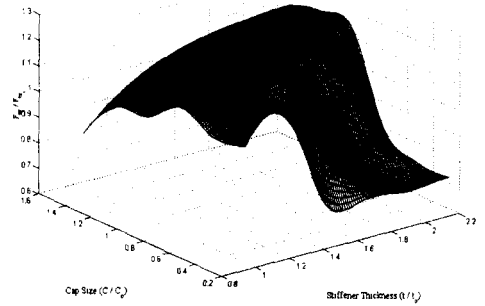


Fig. 11 Buckling load of eigenvalues analysis for variation of cap size and stiffener thickness

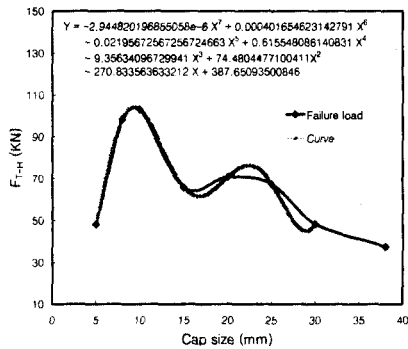


Fig. 9 Curve fitting for approximation of failure load (to optimize failure load of nonlinear analysis)

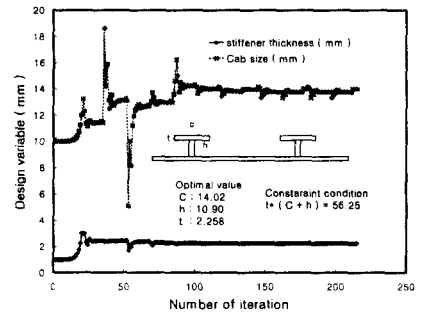


Fig. 12 Variation of design variable during optimization of buckling load for cap size and stiffener thickness

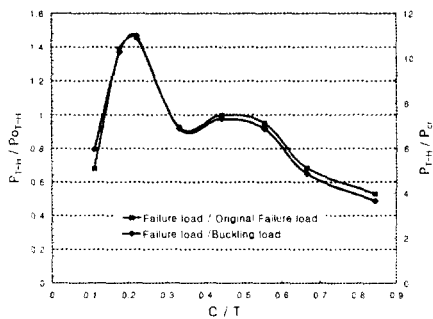


Fig. 10 Variation of nondimensional failure load for aspect ratio

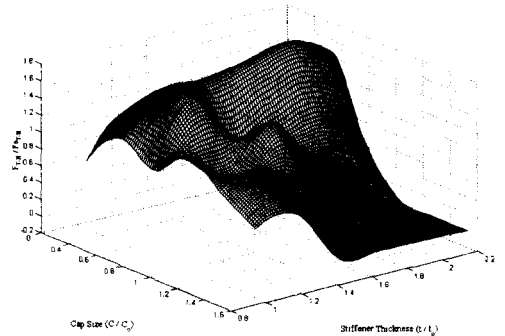


Fig. 13 Failure load of nonlinear analysis for variation of cap size and stiffener thickness

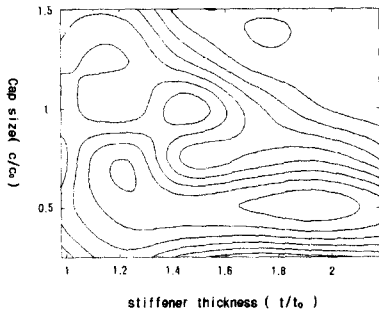


Fig. 14 Contour plot of failure load of nonlinear analysis for variation of cap size and stiffener thickness

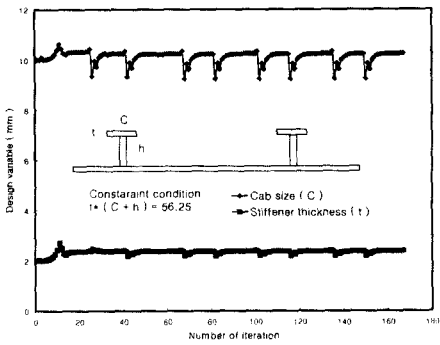


Fig. 15 Variation of cap size and stiffener thickness during optimization of failure load

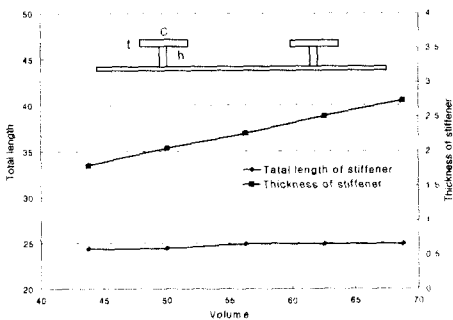


Fig. 16 Variation of thickness and total length by increase of volume of stiffener

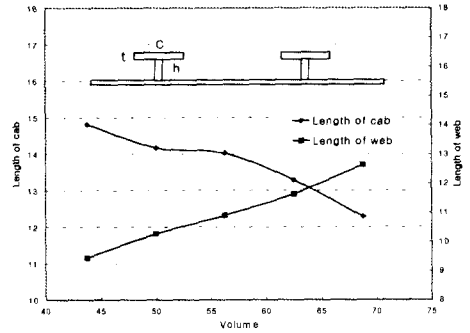


Fig. 17 Variation of length between cap and web by increase of volume of stiffener

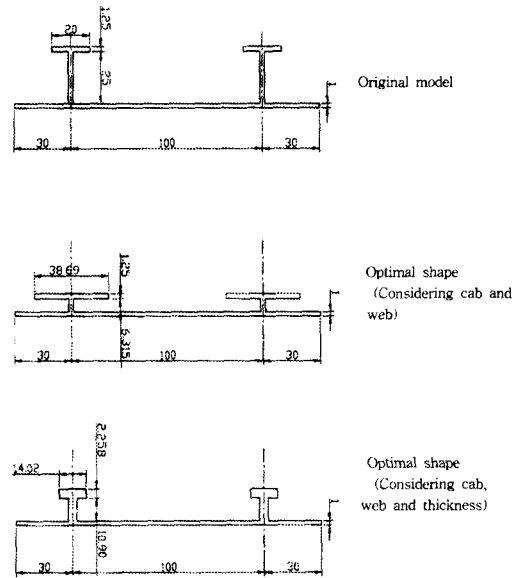


Fig. 18 Shape of stiffener of buckling load for design variable

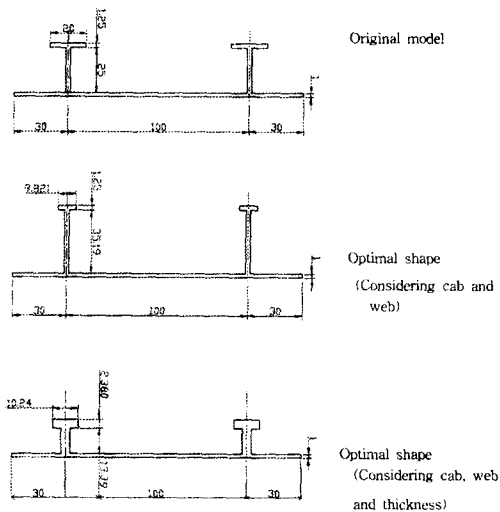


Fig. 19 Shape of stiffener of failure load for design variable

4. 결 론

보강재의 부피가 일정할 때 I-형의 보강된 복합 적층패널에 대한 구속조건(constraint)은 체적을 구속하고 좌굴강도와 파손강도를 최대화시키는 안전설계 측면에 초점을 맞추어 최적 설계를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 좌굴강도와 좌굴후 파손강도의 최적화 조건은 서로 상이하였다. 좌굴강도를 최대화시키는 최적화 조건은 캡의 길이(c)가 웹의 길이(h)보다 상대적으로 큰 경우인 반면, 좌굴후 강도를 최대화시키는 최적화 조건은 웹의 길이(h)가 캡의 길이(c)보다 상대적으로 큰 경우이다.

(2) 좌굴강도를 기준으로 하는 설계와 파손강도를 기준으로 하는 설계에 I-형 보강재를 사용할 때 이러한 결과를 적용할 수 있을 것이다.

(3) 보강재의 부피를 증가시키며 최적화를 수행했을 때, 좌굴강도를 증가시키기 위한 I-형 보강재의 최적형상은 캡과 웹의 길이 합이 거의 일정한 형상을 갖기 때문에 보강재의 두께를 키우는 것이 더 효과적이다.

(4) 본 연구에서는 비선형 해석의 최적설계를 위하여 보간법과 곡선적합을 이용한 근사화(approximate method) 방법을 적용하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Haftka R. T. and Walsh J. L., 1990, "Stacking-sequence Optimization for Buckling of Laminated Plates by Integer Programming," *AIAA JOURNAL*, Vol. 30, pp. 814-819.
- (2) Riche R. L. and Haftka R. T., 1993, "Optimization of Laminated Stacking Sequence for Buckling Load Maximization by Genetic by genetic Algorithm," *AIAA JOURNAL*, Vol. 31
- (3) 이인철, 1995, "보강된 복합적층패널의 좌굴 및 좌굴후 거동," KAIST 항공공학과 박사학위 논문, pp. 103~114.
- (4) Elishakoff and LI Y. W. and Starnes Jr J. H., 1995, "Buckling Mode Localization in Elastic Plates due to Misplacement in The Stiffener Location," *Chaos, Solutions & Fractals.*, Vol. 5, No. 8, pp. 1517~1531.
- (5) Narita Y. and Leissa A. W., 1990, "Buckling Studies for Simply Supported Symmetrically Laminated Rectangular Plates," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, pp. 909~924.
- (6) Starnes J. H, Knight N. F., and Rouse M., 1982, "Postbuckling Behavior of Selected- curved Panels Loaded in Compression," *Experimental Mechanics*, Vol. 22, pp. 231~236.
- (7) Knight N. F., and Starnes J. H., 1988, "Postbuckling Behavior of Selected Curved Stiffened Graphite-Epoxy Panels Loaded in Compression," *AIAA JOURNAL*, Vol. 26, No. 3, March, pp. 344~352.
- (8) Dickson J. N., Cole R. T., and Wang J. T. S., 1980, "Design of stiffened composite panels in the Post-Buckling Range," *Fibrous Composites in Structural Design*, Plenum Press, New York, pp. 313~327.
- (9) Ronald F. Gibson, 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, Inc., pp. 99~130.