

다양한 형태의 보강재로 보강된 원통형패널의 최적설계

이종선*, 원종진⁺

(논문접수일 2005. 9. 9, 심사완료일 2006. 1. 4)

Optimal Design of Stiffened Laminated Composite Cylindrical Panel with Various Types of Stiffeners

Jong-Sun Lee*, Chong-Jin Won⁺

Abstract

The optimal design for stiffened laminated composite cylindrical panels under axial compression was studied using linear and nonlinear deformation theories by finite difference energy methods. Various panel structures were made from Carbon/Epoxy USN125 prepreg and considered 3 types stiffeners. Optimal design analyses of panel structure are carried out by the nonlinear search optimizer, ADS. This optimal design results are compared to the FEM result using ANSYS.

Key Words : Optimal Design(최적설계), Panel(패널), Axial Compression(축압축), Length to Radius Ratio(길이대 반경비), Clamped Support(고정지지), Stiffener(보강재)

1. 서론

항공우주구조물이나 해양구조물에서 스킨(shell)이나 평판의 형태를 가지며 좌굴후 압축강도를 기준으로 좌굴을 허용하여 설계하게 된다. 그런데 좌굴응력과 좌굴후 압축강도를 높이기 위하여 대부분 보강재로 스킨을 보강하게 된다. 따라서 보강된 복합적층 패널에 대한 좌굴뿐만 아니라 좌굴후 거동에 대한 정확하고 폭넓은 연구가 요구된다.

항공기의 날개나 동체의 표피는 보강재로 보강된 얇은 원통형패널(thin cylindrical panel)로 볼 수 있다. 따라서 보강

재에 의한 효과를 적절한 구속조건으로 고려해 주면 이러한 구조물들은 적당한 경계 조건을 갖는 원통형패널로 모형화될 수 있다.

원통형패널은 평판과는 다른 양상의 기계적 거동을 보이게 되는데 그 중 가장 많은 관심을 끌고 있는 것이 좌굴 거동 분야이다.

복합재료는 비강성(specific stiffness), 비강도(specific strength), 피로특성, 낮은 열팽창률 등의 기계적 성질이 우수하고, 이방성(anisotropy)을 이용하여 사용자의 요구조건에 적합한 구성요소를 설계 제작할 수 있는 장점 때문에 산업 분

* 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과 (jongsun@daejin.ac.kr)

주소: 487-711 경기도 포천시 선단동 산 11-1

+ 국민대학교 기계·자동차공학부

야에서 사용량이 증가하고 있고, 이를 이용한 구조설계는 기술자들에게 많은 관심이 되고 있다.

따라서 효율적인 경량화 설계를 위해서 복합재료에 대한 연구가 이루어져 왔으며, 복합재료는 적층방법에 따라 재료 특성이 변하므로 효율적인 설계방법에 대하여 아직도 많은 연구가 진행되고 있다.

Simitses 등^(1,2)은 변화된 Simplex기법을 사용하여 조합하중이 작용하고 있는 보강된 원통셀의 최소중량화 설계를 수행하였으며, Pappas 등^(3,4)은 DAP3를 개발하여 잠수함 압력선체의 최소중량화 설계문제를 해석하였다.

Anderson 등⁽⁵⁾은 항공기 구조물의 최적설계를 위하여 구조용 프로그램인 VIPASA와 비선형 최적화기법인 CONMIN^(6,7)의 조합된 컴퓨터 프로그램 PASCO를 개발하였으며, 이는 단축보강 복합적층판 및 원통형패널의 최소중량화 설계에 널리 사용되고 있다. Agarwal 등⁽⁸⁾은 비선형 수학적기법을 사용하여 축압축하중이 작용하는 Graphite/epoxy의 복합적층원통셀의 최적화를 수행하였으며, Dickson⁽⁹⁾과 Bushnell^(10,11)은 CONMIN을 사용하고, Qiu⁽¹²⁾는 David-Fletcher-Powell 기법을 사용하여 보강된 복합적층 패널과 원통셀의 최적설계문제를 후좌굴영역까지 확장 해석하였다.

본 논문에서는 하중을 받는 폭선부분은 고정지지(clamped support)되며 옆의 직선부분은 단순지지(simple support)되고 T, A, J형 단면의 길이방향 보강재로 보강된 원통형패널에 축압축하중(axial compression)이 작용할 경우 좌굴하중을 유한차분에너지법(FDEM, Finite Difference Energy Method)을 이용한 선형 및 비선형 이론(linear and nonlinear theories)에 의해 구하고 비선형 탐색 최적설계기법인 ADS⁽¹³⁾(Automated Design Synthesis)를 사용하여 해석한다.

해석결과와 타당성을 검증하기 위하여 유한차분에너지법에 의한 전체좌굴하중(general buckling load)과 유한차분 에너지법에 의해 구해진 설계변수의 결과값을 입력자료로 활용하여 유한요소법에 의한 ANSYS로 좌굴해석(buckling analysis)을 수행하여 구해진 전체좌굴하중을 길이대 반경비 L/R=1인 경우에 대하여 비교 검토한다.

2. 최적설계 방법

2.1 문제설정 및 수식화

본 최적설계문제는 일반적인 수학적 프로그래밍 기법에 따라 다음과 같다.

$$\text{Minimize } F(X) \tag{1}$$

$$\text{Subject to } G_j(X) \leq 0, j=1, \text{NIC} \tag{2}$$

$$X_j - X_j^u \leq 0, j=\text{NBC}+1, \text{NIC}, 1 \tag{3}$$

$$X_j^l - X_j \leq 0, j=\text{NBC}+2, \text{NIC}, 2 \tag{4}$$

(NIC = NBC+2NDV)

여기서 X 는 설계변수벡터, $F(X)$ 와 $G_j(X)$ 는 목적함수와 부등제약조건을 각각 나타내고, X_j^u , X_j^l 및 X_j 는 설계변수와 그들의 상, 하한 값을 각각 나타내며, NDV, NBC 및 NIC는 설계변수, 성질제약조건 그리고 전체 부등제약조건 의 수를 각각 나타낸다.

2.2 최적설계 프로그래밍

본 논문에서 사용한 최적설계프로그램 ADS는 비선형 탐색기법으로 Fig. 1은 그 전체 흐름도를 나타낸다.

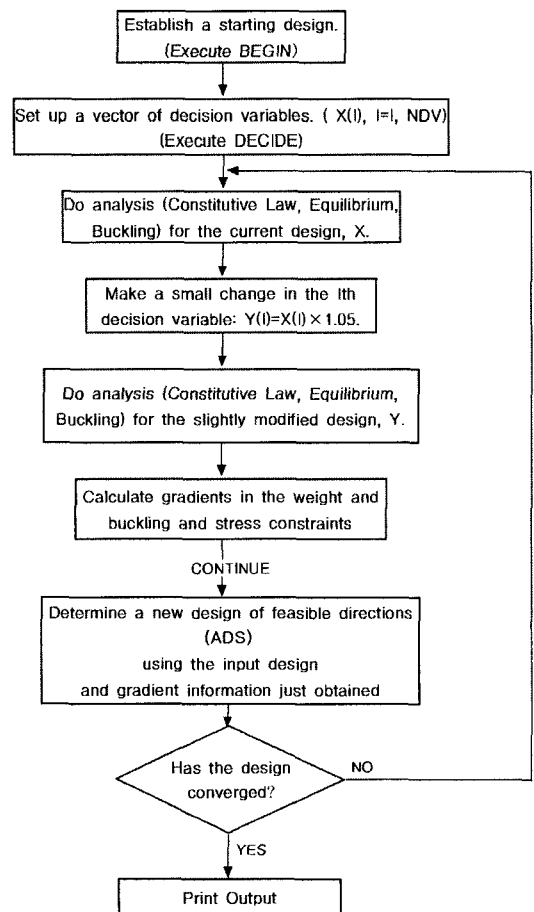


Fig. 1 Flow diagram for the optimal design

3. 최적설계 예 및 해석 결과

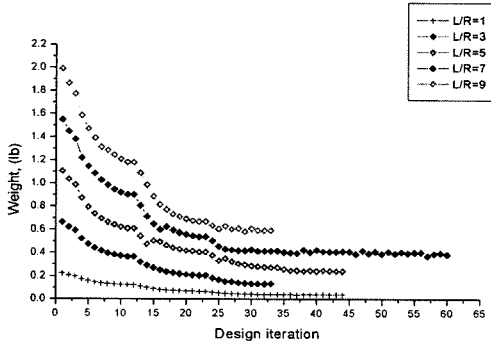
본 논문에서는 복합적층 패널에 축압축하중이 작용하는 경우 길이대 반경비의 변화에 따른 설계변수들의 영향을 검토하였다.

사용된 복합재료는 에폭시 수지계에 탄소섬유를 함침시킨 USN125이며, 적층구조는 skin과 보강재의 경우 $[0/\pm\theta/90]_s$ 같이 대칭적층으로 재료적 성질은 다음과 같다.

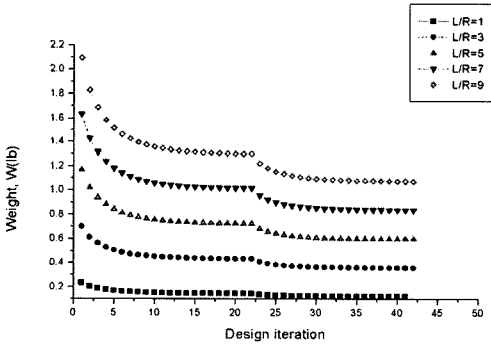
$$E_{11} = 111\text{Gpa}, E_{22} = 7\text{Gpa}$$

$$G_{12} = 4.7\text{Gpa}, \nu_{12} = 0.28$$

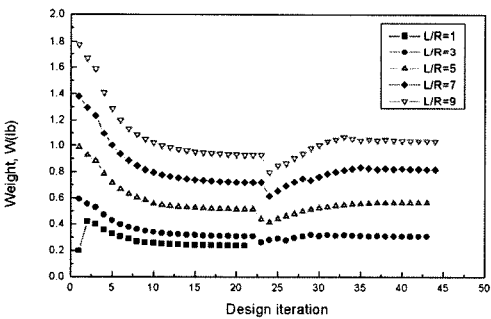
$$R = 120\text{mm}$$



(a) T type

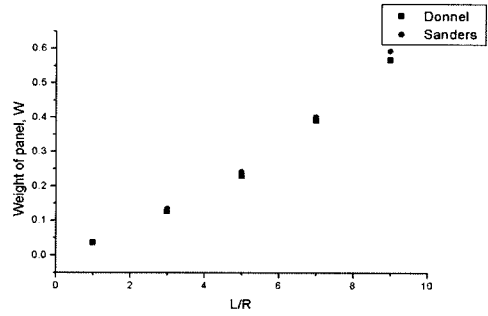


(b) A type

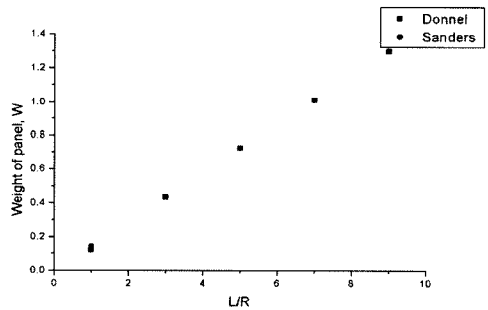


(c) J type

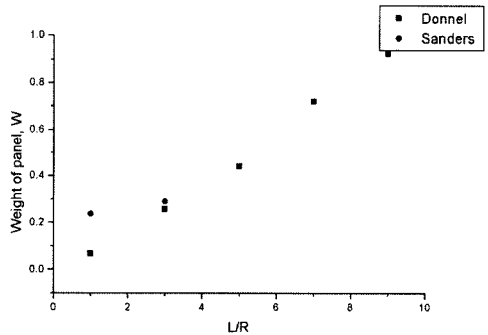
Fig. 2 Convergence curve of object function(weight), W for L/R ratios according to optimal design



(a) T type



(b) A type



(c) J type

Fig. 3 Weight of panel, W for L/R ratios according to optimal design by deformation theories

패널의 길이대 반경비를 $L/R = 1, 3, 5, 7, 9$ 로 변화시켜 해석하였다.

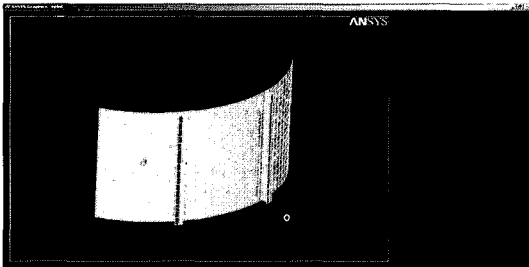
최적설계 예로는 T형 단면의 보강재가 사용된 원통형패널, A형 단면의 보강재가 사용된 원통형패널, J형 단면의 보강재가 사용된 원통형패널을 각각 선정하여 길이대 반경비의 변화에 따른 좌굴하중계수를 유한차분에너지법을 이용한 선형과 비선형 좌굴이론에 의하여 각각 산정하며, 이에 대한 최적설계를 수행한다.

Fig. 2는 축압축하중이 작용할 때 길이대 반경비에 따른 목적함수의 수렴도를 나타내는 그림으로서 T형 보강재, A형 보강재, J형 보강재에 수렴도를 각각 나타낸다. 보강된 원통형패널의 길이대 반경비가 증가함에 따라 보강재의 형

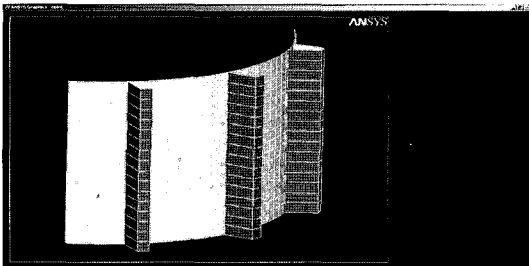
태 별로 중량감소의 효과는 T형-J형-A형의 순서대로 효과가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 설계변수인 목적함수에 대하여 선형 및 비선형 좌굴이론을 적용하여 최적설계를 수행한 결과로서 T형 보강재, A형 보강재, J형 보강재에 대한 해석결과이다. 그림에서 패널의 중량 W 는 길이대 반경비가 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있으며 선형좌굴이론에 의해 산정된 값보다 비선형좌굴이론에 의해 산정된 값이 더 크음을 알 수 있다.

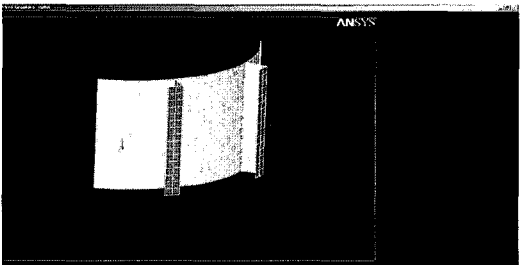
최적설계에 의해서 얻어진 결과의 타당성을 검증하기 위하여 유한차분에너지법에 의한 전체좌굴하중과 유한차분에너지법에 의해 구해진 설계변수의 결과값을 입력자료로 활용하여 ANSYS로 좌굴해석을 수행하여 구해진 전체좌굴 하



(a) T-type

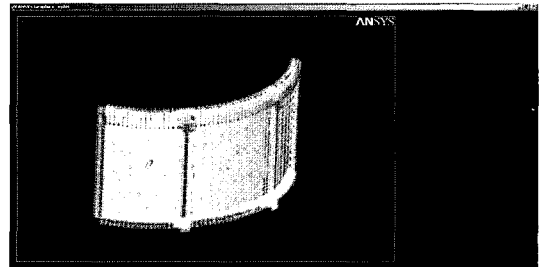


(b) A-type

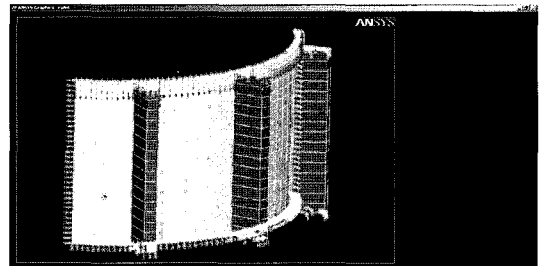


(c) J-type

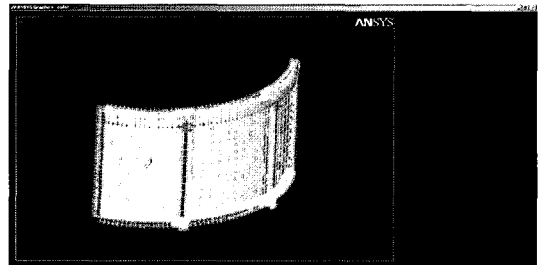
Fig. 4 Elements of cylindrical panel



(a) T-type

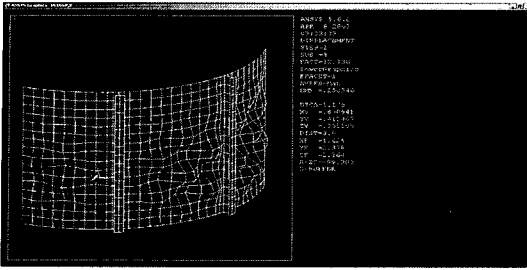


(b) A-type

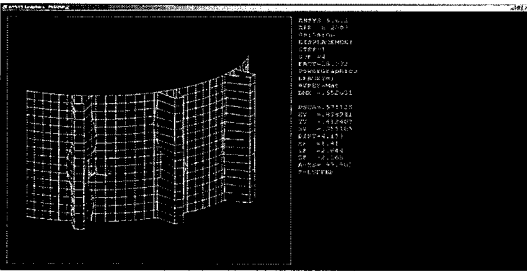


(c) J-type

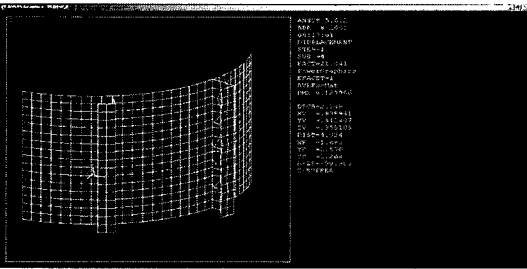
Fig. 5 Boundary and load condition of cylindrical panel



(a) T-type



(b) A-type



(c) J-type

Fig. 6 Buckling mode shape of cylindrical panel

중을 길이대 반경비 $L/R=1$ 인 경우에 대하여 비교 검토한다. Fig. 4는 모델링된 원통형패널을 요소로 나누었을 때 그림이며 Fig. 5는 설계예에 대해서 하중조건과 경계조건을 나타낸 그림이다. 또한 Fig. 6은 좌굴모드형상을 나타낸 그림이다.

Table 1은 유한차분에너지법에 의한 전체좌굴하중과 유한요소법에 의한 전체좌굴하중을 나타내고 있다.

유한차분에너지법과 유한요소법을 통해 구한 좌굴하중 오차는 T형 보강재에서 2.2%, A형 보강재에서 7.93%, J형 보강재에서 10.44%의 오차가 발생하였다

유한차분에너지법과 유한요소법의 해석방법을 통해 구해진 좌굴하중에 오차가 발생하는 이유는 좌굴이론을 통해 해

Table 1 Buckling load according to nonlinear deformation theory and ANSYS eigen solver

Analysis	T-type	A-type	J-type
FDEM	13.24	30.818	23.496
FEM	12.936	28.372	21.041

를 구하는 유한차분에너지법의 해석방법은 좌굴거동을 시간에 따라 구해나가는 유한요소법의 해석방법에 비해 정확도가 다소 떨어지는 것으로 판단되며 이는 유한차분에너지법에 의한 해석이 주로 예비설계단계에 적용되는 것으로도 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 T형 단면, A형 단면, J형 단면의 보강재로 보강되고 축압축하중이 작용하는 경우 여러가지 길이대 반경비에 대해서 좌굴에 대한 최적설계를 수행하였다. 또한 해석의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소법을 이용하는 ANSYS를 활용하여 전체좌굴하중을 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 보강재의 종류에 무관하게 최적설계가 이루어질 경우 길이대 반경비가 커질수록 중량감소 효과가 우수하다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 보강된 원통형패널의 최적설계변수 및 목적함수를 유한차분에너지법에 의해 산정하였을 때 다소 차이는 있으나 길이대 반경비가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었으며, 선형 좌굴이론에 의해 산정된 값보다 비선형 좌굴이론에 의해 산정된 값이 크다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 보강된 원통형패널의 길이대 반경비가 증가함에 따라 보강재의 중량감소 효과는 T형-J형-A형의 순서대로 효과가 큰 것을 알 수 있었다.
- (4) 유한요소법을 사용했을때 좌굴하중은 A형이 가장 큰 것으로 나타났으며 J형, T형 순서대로 좌굴하중의 크기가 나타남을 알 수 있었다.
- (5) 전체 좌굴하중은 유한차분에너지법을 사용했을 때보다 유한요소법에 의해 구해진 하중이 작다. 이는 좌굴이론에 의해 구해진 좌굴하중 보다는 경로의존적인 좌굴형상에 대해서 비선형적인 형상변화를 계산하는 방법을 사용했을 때 더 작다는 것을 의미한다.

참고 문헌

- (1) Simites, G. J. and Ungbhakorn, V., 1975, "Minimum Weight Design of Stiffened Cylinders under Axial Compression," *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 6, pp. 750~755.
- (2) Simites, G.J. and Ungbhakorn, V., 1975, "Minimum Weight Design of Stiffened Cylinders under Axial Compression with and without Lateral Pressure," *Computer & Structure*, Vol. 8, pp. 19~30.
- (3) Pappas, M. and Amba-Rao, C. L., 1971, "A Direct Search Algorithm for Automated Optimum Structural Design," *AIAA Journal*, Vol. 9, pp. 387~393.
- (4) Pappas, M. and Allentuch, A., 1975, "Pressure Hull Optimization Using General Instability Equation Admitting More Than One Longitudinal Buckling Half-Wave," *Journal of Research*, Vol. 19, pp. 18~22.
- (5) Anderson, M. S. and Stroud, W. J., 1979, "General Panel Sizing Computer Code and Its Application to Composite Structural Panels," *AIAA Journal*, Vol. 17, pp. 892~897.
- (6) Zoutendijk, G., 1960, *Method of Feasible Direction*, Elsevier Publishing Co., Amsterdam.
- (7) Vanderplaats, G. N., 1973, "CONMIN - A FORTRAN Program for Constrained Function Minimization," NASA TM X-62-282, version updated in March 1975, Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- (8) Agarwal, B. L. and Sobel, L. H., 1977, "Weight Comparisons of Optimized Stiffened, Unstiffened, and Sandwich Cylindrical Shells," *J. Aircraft*, Vol. 14, No. 10, pp. 1000~1008.
- (9) Dickson, J. N., Biggers, S. B. and Wang, T. S., 1980, "A Preliminary Design Procedure for Composite Panels with Open-Section Stiffeners Loading in the Post-buckling Range," *In Advanture in Composite Material*, Vol. 1, pp. 812~825.
- (10) Bushnell, D., 1983, "PANDA-Interactive Program for Minimum Weight Design of Stiffened Cylindrical Panel and Shells," *Computers and Structures*, Vol. 16, pp. 167~185.
- (11) Bushnell, D., 1987, "Theoretical Basis of the PANDA Computer Program for Preliminary Design of Stiffened Panel under Combined In-Plane Loads," *Computers and Structures*, Vol. 27, No. 4, pp. 541~563.
- (12) Qiu, R., 1985, "Weight Optimization of Stiffened Cylinders under Axial Compression," *Computers and Structures*, Vol. 21, No. 5, pp. 945~952.
- (13) Vanderplaats, G. N. and Sugimoto, H., 1986, "A General Purpose Optimization Program for Engineering Design," *Computers and Structure*, Vol. 24, pp. 13~21.
- (14) Won C. J., Lee J. S. and Hong S. J., 1998, "Optimal Design of Stiffened Laminate Composite Cylindrical Shells," *Transactions of KSMTE*, Vol. 7, No. 6, pp. 12~18.