

설계규칙을 고려한 복합재료 셸 구조물의 최적설계

강지호* · 이재훈* · 김철웅* · 김천곤**

Optimal Design of Composite Shell Structures Considering Design Rules

Ji-Ho Kang, Jae-Hun Lee, Cheol-Ung Kim and Chun-Gon Kim

Key Words : Weight-Minimization, Optimal Design, Genetic Algorithm, Composite, Buckling

ABSTRACT

In this paper, we developed a optimal design system to optimize composite shell structures using genetic algorithm and expert system. The objective of the optimal design was to find designs that minimize weight of the structures and satisfy the design rules specified by the user. Buckling analyses of the composite shell structures were done to estimate buckling loads. Some example problems were selected and optimized with the developed system. And a GUI-based integrated design and optimization program, I-DOTCom was developed and introduced at the end of this paper.

1. 서론

복합재료는 일반적으로 사용되는 금속재료에 비해 높은 비강도와 비강성을 가지는 장점이 있어 최근 항공 우주 산업에 많이 사용되고 있다. 항공 우주 구조물은 경량화가 매우 중요하기 때문에 대부분의 구조물에서 셸이나 평판의 형태를 갖는데 이러한 구조물은 재료 자체의 정적 강도에 비해 상대적으로 낮은 좌굴 하중을 갖는 특징이 있다. 등방성 재료와는 달리 수지에 섬유를 함침시켜 만든 섬유강화 복합재료는 적층 순서의 변화에 따라 다양한 특성을 가지게 되므로 적절한 적층순서와 적층각을 결정함으로써 요구 조건에 적합한 특성을 갖도록 최적 설계를 할 수 있다. 그러나 실제로 사용되는 적층각은 연속적인 값이 아니라 이산적인 값을 사용하며 설계 변수가 많아지면 설계 공간의 파악이 어렵다는 점 등에 의해 최적해를 찾는 데 어려움이 많았다. 90년대 이전의 복합재 구조물의 최적화에 관한 연구의 대부분은 두께나 적층각을 연속적인 설계변수로 가정하여 연구를

수행하였다. 그러나 90년대에는 보다 실제적인 설계를 위해 이산화된 적층각을 이용하는 연구가 많이 진행되었으며[1-5], 단순히 강성이나 강도만을 고려하는 연구 뿐 아니라 무게나 제작 용이성 등을 고려하기도 하였다.

본 연구에서는 유전자 알고리즘과 전문가 시스템을 이용한 최적설계 시스템을 개발하고 압축하중을 받는 복합재료 셸 구조물의 최적설계에 응용해 보았다. 최적설계 문제에서 단순히 수치적인 제한 조건 뿐 아니라, 경험적인 지식을 설계 규칙으로 제안하고 제한 조건으로 사용하였다. 그리고 본 연구실에서 개발된 여러 해석 및 최적화 프로그램들을 통합한 GUI 기반의 해석 및 최적설계 시스템을 간략히 소개한다.

2. 최적설계 기법

본 연구에서는 최적설계 기법으로 유전자 알고리즘을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 자연 진화를 모사하여 다수의 설계점이 전체 최적해로 수렴해 가는 방법으로 계산과정이 확률론적 기법을 사용하므로 미분가능성 등에 영향을 받지 않는다[6]. 그리고 본질적으로 이산화된 설계 변수를 사용하게 되므로 복합재료 적층의 표현이 용이하며, 다

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

수의 설계점이 동시에 설계 공간을 탐색해 나가므로 전체 최적해를 찾을 가능성이 높다. 본 연구에서는 기존 알고리즘을 MPI 라이브러리를 이용하여 병렬화하였으며, 수렴 가속화를 위하여 기존 결과를 이용하도록 유전자 알고리즘을 수정하였다. 또한 실제 계산 회수가 일정 수준 이하로 떨어지게 되면 population size가 적당한 수준으로 자동적으로 증가하도록 하여 초기 수렴을 막고 병렬 처리시 모든 CPU가 가능한 동일한 수준의 계산을 할당받도록 하였다.

3. 설계 규칙의 적용

4.1 전문가 시스템

복합재료의 최적설계 결과를 실제에 적용하기 그대로 적용하기 어려운 이유 중의 하나는 복합재료는 2D 구조물이라 할지라도 3D 응력 성분에 의한 변형과 파손을 무시할 수가 없다는 점이다. 그 대표적인 예로는 층간분리를 들 수 있다. 그러므로 실제 현장에서는 최적설계의 결과보다는 경험에 의한 설계를 더 신뢰하는 경향이 있다. 본 연구에서는 최적설계 시에 이러한 경험적인 지식을 반영하기 위하여 전문가 시스템을 이용하였다. 사용한 전문가 시스템 틀은 NASA/Johnson 우주센터에서 만든 CLIPS이다. 최적설계 과정에서 전문가 시스템의 역할은 설계점의 설계 규칙 위반 여부 판단과 평가이다. 사용된 설계 규칙은 표 1과 같다. 이러한 설계 규칙들은 하중 및 경계 조건과 최적설계의 목적 함수에 따라 주의깊게 적용되어야 하며, 일반적으로 적용되는 예는 표 2와 같다.

4.2 설계점의 평가 및 평가 결과의 적용

본 연구에서 사용하고 있는 유전자 알고리즘의 수행 과정 중에서 설계 규칙의 적용이 이루어지는 시점은 각 설계점의 적합성을 계산하는 부분에서이다. 판단 기준은 위반한 설계 규칙의 개수에 따라 열등한 정도에 차이를 두도록 하여 설계 규칙의 위반 개수를 일종의 설계 변수의 개념으로 보아 설계 규칙의 위반 개수가 점차 줄어드는 방향으로 설계점이 개선될 수 있도록 하였다. 기본적인 적합성에 단순히 설계 규칙을 만족하는 정도를 곱하는 것이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f = \begin{cases} \frac{W_{\max}}{W} \frac{11N_{cr}}{10N_{cr} + N_{cr,design}} \frac{n_{rule,obeyed}}{n_{rule,activated}}, & N_{cr} \geq N_{cr,design} \\ \frac{N_{cr}}{N_{cr,design}} \frac{n_{rule,obeyed}}{n_{rule,activated}}, & N_{cr} < N_{cr,design} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 W_{\max} 와 W 는 각각 최대가능 무게와 현재

설계점의 무게이며, N_{cr} 과 $N_{cr,design}$ 은 각각 현재 설계점의 좌굴 하중과 설계 좌굴 하중이다. 그리고 $n_{rule,obeyed}$ 는 만족되어진 설계 규칙들의 개수, $n_{rule,activated}$ 는 활성화된 설계 규칙들의 개수이다.

4. 복합재료 셀 구조물 최적설계

지금까지 개발된 통합 최적설계 시스템을 이용하여 실제 구조물에 사용될 수 있는 형태의 문제를 선정하여 인자별 연구를 수행하였다. 본 연구에서 선정된 복합재 구조물은 곡률을 갖는 복합재료 셀, 곡률을 갖고 원공이 존재하는 복합재료 셀과 보강 평판이다. 모든 경우에 대해 하중 방향의 스킨 길이는 고정하고 스킨의 세장비를 변화시켜 가며 최적설계를 수행했다. 사용 재료는 Graphite/Epoxy와 Glass/Epoxy로 표 3과 같은 물성을 갖는다.

4.1 곡률을 갖는 복합재료 셀의 최적설계

최적설계 문제는 주어진 형상에서 사용자가 정한 설계 좌굴 하중을 견디며 무게를 최소화하는 문제로, 사용된 설계 변수는 적층각과 적층수, 그리고 플라이 별 재료이다. 최대 적층수는 16장으로 제한하였다. 전체적인 형상은 그림 1(a)와 같고, 하중이 가해지는 위치인 위아래는 고정지지이며 옆면은 단순지지이다. 사용 재료는 표 3에서와 같고, 각 플라이 별로 각기 다른 재료가 선택될 수 있도록 하였다. 설계 좌굴 하중의 결정을 위해서 모든 플라이는 Glass/Epoxy를 사용하고 적층각은 $[45/-45/90/0_2/90/-45/45]_s$ 을 사용하여 좌굴 하중을 계산하고 그 값을 설계 좌굴 하중으로 사용하였다. 셀의 하중 방향 길이와 너비는 각각 355.6mm, 381mm로 결정하였고, 곡률의 중심각을 15° 에서 90° 까지 5° 간격으로 변화시켰다. 최대 적층수는 32장으로 대칭적층을 고려하여 16장만이 설계변수로 사용된다. 적층각과 재료를 나타내는 이진 코드의 표현은 표 4와 같고, 사용된 설계 규칙은 표 5와 같다. 최적설계의 결과는 표 6에 나타내었다. 표 6에서 Gen.은 해가 수렴했을 때의 세대수이며, 아래첨자 (Gr)은 해당 플라이의 재료가 graphite임을 나타내고, violated rules는 최적해가 설계 규칙에 어긋날 경우 위반한 설계 규칙을 나타내며, W_{\max} 는 설계 변수로 표현 가능한 최대 무게를 나타낸다. $N_{cr}/N_{cr,design}$ 과 W/W_{\max} 는 최적설계의 효과를 나타내는 성능지수이다. 본 최적설계의 결과, $N_{cr}/N_{cr,design}$ 은 대략 1.1에서 1.5사이의 값을 가졌으며, W/W_{\max} 는 모든 경우에 대해서 0.56의 값을 가졌다.

4.2 곡률을 갖고 원공이 존재하는 복합재료 셸의 최적설계

최적설계 문제는 기본적으로 4.1 절에서와 동일하며, 다만 원공의 직경도 설계 변수로 사용하였다. 전체적인 형상은 그림 1 (b)와 같다. 설계 좌굴 하중의 결정 방법은 4.1 절에서와 같고, 다만 원공의 직경은 50mm 로 결정하여 좌굴 하중을 계산하였다. 원공의 직경도 설계변수로 두었으며 20mm~275mm 의 범위 내에서 값을 갖도록 하였다. 기타 언급되지 않은 사항은 4.1 절에서와 같다. 최적설계의 결과는 표 7 에 나타내었다. 본 최적설계의 결과, $N_{cr}/N_{cr,design}$ 은 대략 1.0 에서 1.5 사이의 값을 가졌으며, W/W_{max} 는 모든 경우에 대해서 0.44 또는 0.56 의 값을 가졌다.

4.3 보강된 복합재 평판의 최적설계

두 개의 보강재로 보강된 복합재 평판에 대해 스킨의 세장비를 변화시키며 최적설계를 수행하고 그 결과를 비교해 보았다. 사용된 설계 변수는 스킨의 적층각과 적층수, 플라이벨 재료와 보강재의 적층각과 적층수, 플라이벨 재료와 보강재의 형상과 간격이다. 전체적인 형상은 그림 2 와 같고, 하중점인 위아래는 고정지지이며 옆면은 아무런 경계조건을 가하지 않았다. 설계 좌굴 하중의 결정 방법은 4.1 절에서와 같다. 본 최적설계 문제에 대한 형상과 설계 변수, 그리고 설계 좌굴 하중에 대한 정보들을 정리하여 보강재 별로 각각 표 8 과 표 9 에 나타내었다. 기타 언급되지 않은 사항은 4.1 절에서와 같다. 최적설계의 결과는 보강재의 형상에 따라 각각 표 10 과 표 11 에 나타내었다. 본 최적설계의 결과, $N_{cr}/N_{cr,design}$ 은 대략 1.1 에서 1.3 사이의 값을 가졌으며, W/W_{max} 는 모든 경우에 대해서 0.3 에서 0.5 의 값을 가졌다.

5. I-DOTCom 개발

본 실험실에서는 그간 많은 수의 해석 및 설계 프로그램들을 개발해왔다. 그러나 각 해석 및 최적설계 모듈들은 서로 상이한 프로그램 구조와 사용법을 가지므로 비숙련된 사용자가 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 그러므로 모든 모듈이 유사한 사용자 인터페이스를 갖고 다양한 해석 및 최적설계를 수행할 수 있는 GUI 기반의 통합된 복합재료 해석/최적설계 시스템을 개발이 필요하였다.

본 실험실에서 개발된 통합 해석/최적설계 시스템은 IDOTCom(Integrated Design & Optimization Tool for Composites)이라 명명되었으며(그림 3),

Microsoft Windows OS(Windows 98, Me, 2000, XP) 기반의 개인용 컴퓨터에 맞추어 개발되었다.

6. 결론

본 연구에서는 유전자 알고리즘과 전문가 시스템을 이용하여 설계 규칙을 적용할 수 있는 복합재료 셸 구조물의 최적설계 시스템을 개발하고, 몇가지 경우에 대해 최적설계를 수행해보았다. 그리고 본 실험실에서 개발된 각종 해석 및 설계 프로그램들을 통합한 GUI 기반의 해석 및 최적설계 시스템을 소개하였다.

후기

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 기초연구과제의 일환으로 수행되었으며, 지원에 대해 진심으로 감사드리는 바이다.

참고문헌

- (1) D. K. Shin and Jr. O. H. Griffin, "Minimum-Weight Design of Laminated Composite Plates for Postbuckling Performance," AIAA Paper, presented at the AIAA/ASME/ASCE/AHS 31th structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, pp.257-266, 1991.
- (2) S. Adali, A. Richter, V. E. Verijenko and E. B. Summers, "Optimal Design of Hybrid Laminates with Discrete Ply Angles for Maximum Buckling Load and Minimum Cost," Composite Structures, Vol.32, pp.409-415, 1995.
- (3) B. Malott, R. C. Averill, E. D. Goodman and W. F. Punch, "Use of Genetic Algorithms for Optimal Design of Laminated Composite Sandwich Panels with Bending-Twisting Coupling," AIAA Paper, presented at the AIAA/ASME/ASCE/AHS 36th structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, pp.1874-1881, 1996.
- (4) A. S. Fine and G. S. Springer, "Design of Composite Laminates for Strength, weight, and Manufacturing," Journal of Composite Materials, Vol.31, No.23, pp.2330-2390, 1997.
- (5) C. A. Perry, Z. Gürdal and J. H. Starnes JR, "Minimum-Weight Design of Compressively Loaded Stiffened Panels for Postbuckling Response", Engineering Optimization, Vol.28, pp.175-197, 1997.
- (6) D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, Boston, MA, 1989.

