

굽힘-비틀림 복합하중을 받는 복합재료 구조물의 최적 강건 설계

윤지용*·오광환*·남현욱**·한경섭***

Robust Design of Composite Structure under Combined Loading of Bending and Torsion

J.Y. Youn, K.H. Oh, H.W. Nam and K.S. Han

Abstract

This research studied robust design of composite structure under combined loading of bending and torsion. DOE (Design of Experiment) technique was used to find important design factors. The results show that the beam height, beam width, layer thickness and stack angle of outer-layer are important design parameter. The 2nd DOE and RSM (Response Surface Model) were conducted to obtain optimum design. Multi-island genetic algorithm was used to optimum design. An approximate value of 6.65 mm in deflection was expected under optimum condition. Six sigma robust design was conducted to find out guideline for control range of design parameter. To acquire six sigma level reliability, the sigma level reliability, the standard deviation of design parameter should be controlled within 2.5 % of average design value.

Key Words: Design of Experiment, Response Surface Method, Robust Design, Reliability Analysis

1. 서 론

복합재료는 단독재료로서는 가질 수 없는 높은 비강성, 비강도 등의 우수한 재료 특성을 가지 있으므로 산업분야가 다양해지고 경량화를 요구함에 따라 금속 재료를 대신하여 많이 사용되어지고 있다[1]. 이러한 복합재료 중 섬유강화 복합재료는 적층판의 두께와 섬유의 각도 그리고 적층 순서를 결정할 수 있는 이방성 재료의 특성을 갖고 있다. 이에 따라 복합재료 구조물의 설계는 구조의 외각 형상 치수뿐만 아니라, 적층판 각층의 두께와 섬유방향, 적층 순서 등의 많은 설계 변수를 지니게 된다.

복합재료 구조물에 대하여 신뢰도가 높은 설계를 하기 위해서는 각 설계 변수 중 주요한 설계 변수가 어떤 값을 가지고 어떻게 관리되어야 하는지 파악하는 것이 중요하다. 실험계획법을 통한 강건 최적 설계를 이용하면, 설계의 주요 인자를 파악할 수 있으며, 실제 제작에 있어서 필요한 신뢰도를 얻을 수 있다[2].

그 예로 굽힘과 비틀림을 동시에 받는 사각 중공형 외팔보의 복합재료 구조물에 대하여 강건 최적 설계를 실행하였다. 형상은 Fig. 1과 같으며, 직각 형태의 외팔보로 이루어져 있어서, 굽힘과 비틀림을 동시에 받는다.

본 연구에서는 구조물이 높은 강성을 지녀야 한다는 가정 하에 최대 처짐량이 최소가 되도록 하는 것을 목적함수로 하였다. 실험계획법을 이용하여 설계에서 주요한 변수를 도출해 내었고, 반응표면법과 유전자 알고리즘을 사용하여 최적 값을 도출하였다. 또한 식스 시그마 강건 설계를 이용하여 설계값이 어느 정도로 관리 되어야 식

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 청주교육대학교 실과교육과

*** 포항공과대학교 기계공학과

스 시그마 수준을 달성할 수 있는지 계산하였다.

2. 실험계획법 및 최적설계

2.1 유한 요소 해석

유한 요소 해석은 상용 FEM 해석도구인 ANSYS 8.0 을 사용하였다. 8개의 질점을 갖는 shell99 요소이며, 각 질점의 자유도는 6이다[3].

유한요소 모델링 형상은 Fig. 1과 같다. 경계조건은 큰 사각 중공 보의 한쪽 끝단을 완전 고정하였으며, 하중 조건은 큰 사각 중공 보에 직각으로 놓인 하위 외팔보가 하중을 균일하게 받는다고 가정하였다.

2.2 설계 변수

설계 변수는 큰 외팔보의 길이, 폭, 높이와 함께 프리프레그의 두께로 선정하였으며, 각 층의 적층 각도를 변수로 설정하였다. 총 적층 수는 40층이며, 대칭으로 하여 적층각에 대한 설계 변수는 20개이다. 각 layer의 명칭은 Fig. 2에 나타내었다. x 축에 대하여 홀수 번째 layer의 적층각은 (-)방향, 짝수 번째 적층각은 (+)방향으로 0에서 90도까지 변화되도록 하여 교차 적층이 되도록 설정하였다.

2.3 실험계획법

시간이 많이 소요되는 복잡한 해석을 수행할 때, 실험계획법을 이용하면, 몇 번의 해석으로 인자의 영향을 파악하여 주 인자가 무엇인지 파악할 수 있다.

본 연구에서는 24개 인자 3수준으로 108회 해

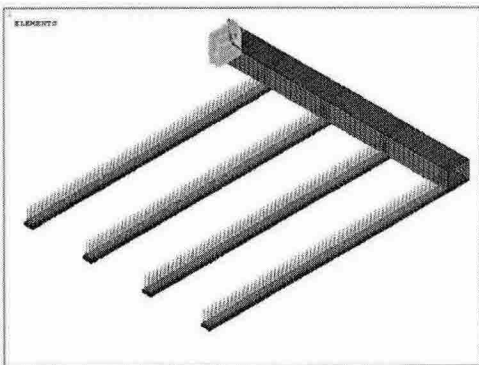


Fig. 1 Loading and boundary conditions

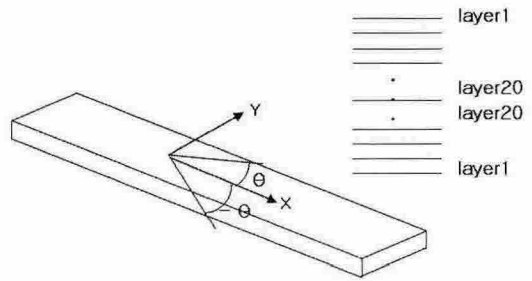


Fig. 2 Stacking Sequence and Coordinates

석하여 1차 실험계획을 수행하여 주 인자를 찾아내었다. 실험에 사용된 변수 값은 Table 1과 같다. 목적함수는 핑거 끝단의 최대 처짐량이다.

해석 결과는 파레토 차트를 이용하여 Fig. 3과 같이 나타냈다. 90 %의 신뢰도(alpha=0.10)를 기준으로 할 때 주요 인자는 보의 높이, layer의 두께, 보의 너비 그리고 1, 3번째 layer의 적층각도 순으로 나타났다. 따라서 강성을 높이기 위해서는 여러 설계인자 중에서 보의 높이를 증가시키는 것이 가장 유리하다. 적층각 측면에서 볼 때는 1, 3, 2번 등의 외각층의 적층각도가 16, 17, 14번 등의 중간층 적층각도에 비하여 처짐에 큰 영향을 미친다. 또한 교차적층에 있어서 홀수 번째 적층각도가 짝수 번째 층의 적층각도에 비하여 중요하다. 실제로 복합재료를 제조할 때는 충격에 대한 신뢰성 문제 때문에 직조형 프리프레그를 섞어서 사용하는 경우가 있는데, 본 해석의 결과로 볼 때, 외각층보다는 중간층에, 홀수 번째 층보다는 짝수 번째 층에 이를 삽입하는 것이 바람직하다는 결과를 보여준다.

주요 인자에 대하여 주 효과를 나타내면 Fig. 4와 같다. 최대처짐량을 최소화 하기 위해서는 보

Table 1 Variable range of design parameter for the 1st DOE

Variable	-1	0	1
Length(mm)	2500	2600	2700
Height(mm)	190	220	250
Width(mm)	240	270	300
Thickness	0.22	0.26	0.30
Angle 1-20	0	45	90

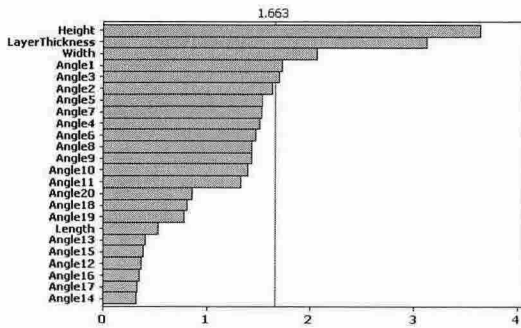


Fig. 3 Pareto chart of the standardized effects (alpha=0.1)

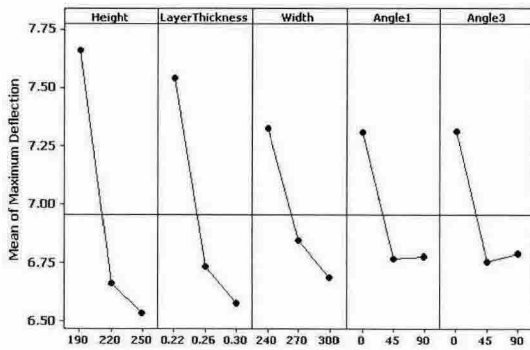


Fig. 4 Main effect plot of design parameter

의 높이, 너비, layer의 두께는 증가시키는 것이 바람직한 설계가 된다. 1, 3번째 층의 적층각의 최적값은 45°와 90° 사이에 있다.

2.4 최적설계

반응표면을 얻기 위하여 2차 실험계획법을 실행하였다. 2차 실험계획법은 1차 실험계획법을 통해 구한 5개의 주요 인자에 대하여 중심합성법으로 43회 해석하였다. 설계 변수 중, 적층각은 1, 3번째 층뿐만 아니라 모든 층의 적층각이 최적설계 시에 고려하도록 하되, 홀수 번째 layer의 적층각과 짝수 번째 layer의 적층각을 각각 통일하여 $[(-\theta_1/\theta_2)_{10}]_s$ 형태로 적층하여, 2개의 설계 변수를 지니도록 하였다.

반응표면은 2차 실험계획법을 통해 구한 결과를 바탕으로 얻었다. 반응표면은 회귀 식이므

Table 2 Variable range of design parameter for the 2nd DOE

Variable	-2.236	-1	0	1	2.236
Height	152.9	190	220	250	287.1
Width	202.9	240	270	300	337.1
Thickness	0.171	0.22	0.26	0.30	0.349
Angle 1	-55.6	0	45	90	145.6
Angle 2	-55.6	0	45	90	145.6

로, 그 신뢰도를 검증해보았는데, 이 때 오차항인 R^2 은 0.961로 신뢰할만한 수준으로 나타났다.

반응표면을 통해 얻은 관계식은 multi-island 유전자 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 이 때 모집단, island, 세대의 수는 10으로 하고, 염색체는 32 bit를 사용하였다.

실험계획법, 반응표면법, 최적설계는 iSight 7.1을 이용하여 수행하였다. 최적 조건은 보의 높이 249.6 mm, 너비 297.9 mm, layer의 두께 0.295 mm, 홀수 번째 적층각 69.3° 짝수 번째 적층각 29.8°로 계산되었다. 이 때 최대 처짐은 6.65 mm로 나타났다.

3. 식스 시그마 강건 설계

실제 제품제작의 과정은 설계 인자의 변동을 반드시 동반하므로, 설계 인자의 변동을 고려할 필요가 있다. 식스 시그마 강건 설계의 개념은 최적 설계에서 구한 설계 값과 그 설계값들의 편차가 있을 때 사용자가 원하는 합격치를 기준으로 편차가 어느 정도 발생하더라도 식스 시그마 수준(100만개 중에 1개의 불량)의 합격률을 달성하도록 편차관리 또는 설계값의 결정을 하는 것이다.

시그마 값을 계산하기 위한 목표함수의 상한값으로 최대변형이 7 mm 이내로 되는 것을 기준하여 해석을 수행하였다. 각 설계 변수의 표준편차는 2 ~ 10 % 범위에서 변동시켰다. 설계변수는 최적 설계점을 기준으로 정규분포를 가진다고 가정하였으며, Monte Carlo Simulation을 통해 1000개의 데이터를 무작위 생성하였다.

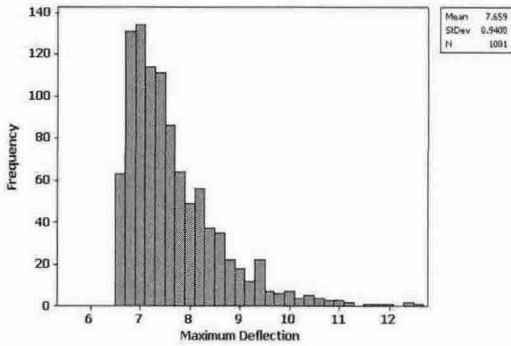
Fig. 5에 강건 설계를 수행한 후 최대 변형량의 히스토그램을 나타내었으며, Fig. 6에 설계

변수 변동 폭에 따른 시그마 값을 나타내었다. 식스 시그마 수준의 신뢰성을 확보하기 위해서는 설계변수의 표준편차가 평균의 2.5 %이내에서 관리되어야 함을 알 수 있다.

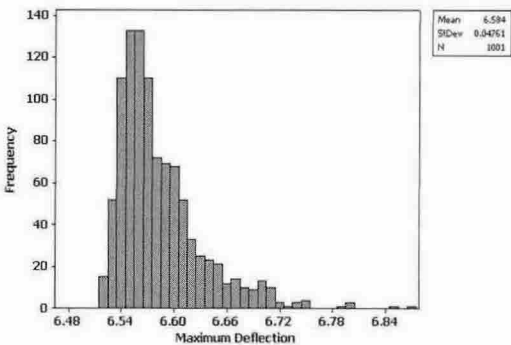
4. 결론

본 연구에서는 강건 최적 설계를 통하여 복합재료 구조물의 최적값을 구하고 신뢰성을 확보하는 과정을 곱힘과 비틀림을 받는 복합재료 구조물을 통하여 제시하였다.

여기서 복합재료 구조물의 여러 설계변수 중, 주요 인자는 보의 높이, layer의 두께, 보의 너비, 외각층의 적층각도로 나타났다. 이를 바탕으로 하여, 주요 인자에 대한 최적 설계값을 도출할 수 있었다. 또한 식스 시그마 강건 설계 공정을 확보하였으며, 식스 시그마 수준의 신뢰성을 확보하기 위한 설계 변수 관리 범위를 찾아내었다.



(a) Standard deviation of variable (10 % Avg.)



(b) Standard deviation of variable (2 % Avg.)

Fig. 5 Histogram of maximum deflection

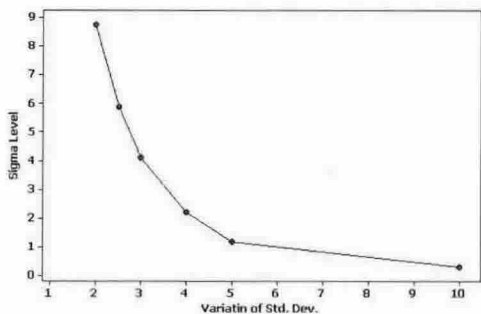


Fig. 6 Sigma level according to variation of Standard. deviation.

참고문헌

- (1) 한경섭, 황운봉, 송정일, “한국복합재료의 현황 조사,” 한국복합재료 학회지, 1991, 제4권, 제2호, pp. 79~95
- (2) 남현옥, “이방성 전도 필름을 이용한 플립칩 패키지의 열피로 수명 예측 및 강건설계,” 대한기계 학회 논문집 A권, 제28권, 제9호, 2004, pp. 1408~1414
- (3) ANSYS Release 8.0 Documentation
- (4) Nam H. W., Hwang W. B. and Han, K. S., “Stacking Sequence Design of Fiber Metal Laminate for Maximum Strength,” *Journal of Composite Materials*, Vol 25, No18, 2001, pp 1653~1683
- (5) Aroa, J. S., Elwakeil, O. A. and Chahande, A. I. Global Optimization Methods for Engineering Application a Review, “*Structural Optimization*, Vol 9, pp 137~159