

최적화 해석 기법을 이용한 복합재 압력용기의 스커트 치수 선정에 관한 연구

김준환* · 전광우* · 신광복**† · 황태경***

A Study on the Skirt Size Selection of a Composite Pressure Vessel using Optimum Analysis Technique

Junhwan Kim* · Kwangwoo Jeon* · Kwangbok Shin**† · TaeKyung Hwang***

ABSTRACT

The purpose of this study is to find the optimum skirt size for a composite pressure vessel using optimum analysis technique. The size optimization for skirt shape of a composite pressure vessel was conducted using sub-problem approximation method and batch processing codes programmed by APDL(ANSYS Parametric Design Language). The thickness and length of skirt part were selected as design variables for the optimum analysis. The objective function and constraints were chosen as weight and displacement of skirt part, respectively. The numerical results showed that the weight of skirt of a composite pressure vessel would be saved by maximum 4.38% through the size optimization analysis for the skirt shape.

초 록

본 연구의 목적은 최적화 해석 기법을 이용하여 복합재 압력용기의 스커트 치수를 도출하는 것이다. 복합재 압력용기의 스커트 최적화 해석은 부분문제 근사법(sub-problem approximation method) 알고리즘을 사용하였으며, APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 해석의 모든 과정을 일괄처리(batch processing)하였다. 설계변수로는 압력용기 스커트 부위의 두께와 길이를 선정하였으며, 내압에 의해 발생하는 변위와 무게를 각각 목적함수로 하여 최적화 해석을 통해 최적의 스커트 치수를 도출하였다. 그 결과 복합재 압력용기의 스커트 무게를 최대 4.38% 절감할 수 있었다.

Key Words: Composite Pressure Vessel(복합재 압력용기), Optimum Design(최적설계), Size Optimization (치수 최적화)

1. 서 론

* 국립한밭대학교 기계설계공학과

** 국립한밭대학교 기계공학과

*** 국방과학연구소 추진기관부

† 교신저자, E-mail: shin955@hanbat.ac.kr

복합재 적용 고압 용기는 우수한 기계적 강도를 유지하면서 경제적인 무게절감 효과를 얻을

수 있어 최근 그 사용이 증가되고 있는 실정이다[1]. 이러한 복합재료 압력용기는 필라멘트 와인딩(filament winding) 공법을 통해 제작되며, 이는 섬유강화 복합재료의 장점을 극대화한 구조물이라 할 수 있다. 이러한 복합재 압력용기의 내부 공간 확보, 중량 등은 제품성능의 중요한 요인이 되기 때문에 성능 향상을 위한 최적화 연구가 활발히 이루어지고 있다[2].

최근 최적화 설계는 유한요소법의 발달과 다양한 알고리즘의 발달로 여러 분야에 최적설계 적용이 이루어져 왔다. 대표적으로는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms:G.A), 다구찌 법(Taguchi Method), 식스 시그마 기법(six sigma) 등이 사용되고 있으며, 이밖에도 많은 알고리즘 및 기법 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 상용유한요소 해석 프로그램 ANSYS 코드인 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 사용한 최적화 해석 방법을 제시하였다. 이를 복합재 압력용기 스킨트 최적설계에 적용하여 최적화된 스킨트 치수를 도출하였다.

2. 복합재 압력용기의 구성

2.1 복합재 압력용기의 구성

일체성형을 통해 제작되는 일반적인 복합재 압력용기와 달리 본 연구에 사용된 복합재 압력용기는 돔과 원통부를 각각 따로 제작하여 접합하는 구조를 갖고 있다. 또한, 돔의 전방에 스킨트를 적층함으로써 내압에 의한 돔과 원통부의 분리현상을 방지하고자 하였다. 이때, 복합재 압력용기는 T800/Epoxy 탄소섬유 복합재가 적용되었으며 돔과 원통부의 접착 체결은 FM73을 사용하였다. Fig. 1은 복합재 압력용기의 구성을 보여준다.

2.2 복합재 압력용기 적용 물성

복합재 압력용기 최적화 해석을 수행하기 위한 적용 재료의 기계적 물성은 시험을 통해 Table 1과 같이 구하였다.

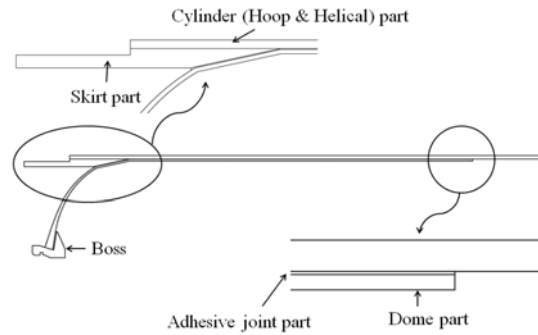


Fig. 1 Configurations of a composite pressure vessel

Table 1. The mechanical properties of materials applied to the composite pressure vessel

Properties		T800/Epoxy	AISI4130	FM73
Elastic Modulus(GPa)	E ₁	174	210	4.2
	E ₂	9		
	E ₃	9		
Shear Modulus(GPa)	G ₁₂	5	-	-
	G ₁₃	5		
	G ₂₃	2.5		
Poisson's ratio	v ₁₂	0.3	0.3	0.45
	v ₁₃	0.3		
	v ₂₃	0.4		

2.3 복합재 압력용기 유한요소모델링

복합재 압력용기의 복합재 부분은 3차원 적층 솔리드 요소(3D layered structural solid)를 사용하였으며, 접착부와 보스부는 3차원 솔리드 요소(3D structural solid)를 적용하였으며, 돔 부의 와인딩 각은 장력 돔 이론[3]을 적용하여 섬유 방향의 적층 각도 변화를 고려하여 모델링하였다. 또한, 복합재 압력용기의 2°만 모델링하여 해석의 단순화를 도모 하였으며, 모델링 단면에 순환대칭(cyclic symmetry)조건을 부여하였다.

압력용기의 구속은 원통부 끝단의 길이방향에 대해 대칭 경계조건($U_z=0$)을 부여하였으며, 금속 보스 끝단은 시험 치구를 모사하기 위해 반경 및 각도 방향의 변위($U_r, U_\theta=0$)를 고정하고 축방향 하중을 분포 하중으로 변환하여 금속 보스

끝단에 적용하였다. 또한, 금속 보스와 복합재 돔 간의 상대 변형을 허용하기 위해 고무층이 적용되었고, 내부압력 2,500psi를 적용하였다. 이러한 유한요소모델링의 모든 과정은 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 사용하여 수행되었다. Fig. 2는 복합재 압력용기의 유한요소 모델을 나타낸다.

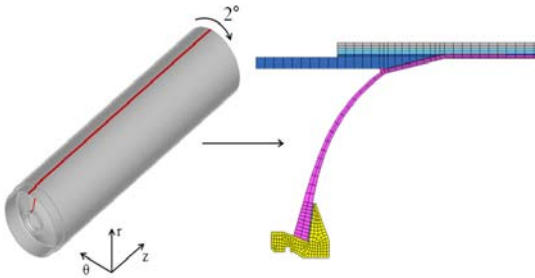


Fig. 2 Finite elements models of a composite pressure vessel

3. 복합재 압력용기의 스킨트 치수 최적화 해석

3.1 복합재 압력용기 최적화 해석 프로세스

복합재 압력용기 스킨트 형상의 최적화 해석은 다음 두 단계를 통해 최적의 스킨트 치수를 도출하였다.

① 최적화 기법을 통해 접착체결로 이루어진 돔과 원통부의 분리현상을 방지하기 위해 내압에 따른 변위를 최소화 하는 스킨트 치수 도출

② 첫 번째 단계에서 도출된 최소 변위를 제약조건으로 하고, 무게를 목적함수로 하는 스킨트 치수 최적화 해석 수행

이때, 최적화 해석은 Fig. 3과 같이 APDL 을 사용하여 모델링 생성, 설계변수 변경과 같은 모든 프로세스를 일괄처리 하였다. APDL은 최적화 해석과 같이 반복적인 해석을 수행할 경우 설계변수 등을 쉽고 빠르게 변경할 수 있어 효과적인 방법으로 사용할 수 있다.

복합재 압력용기 모델에 대한 최적화 해석은 부분문제 근사법을 이용하여 수행하였다. 이는,

도함수가 아닌 오직 종속변수(상태변수와 목적함수)의 값을 필요로하는 영계법(zero-order method)의 발전된 형태라 할 수 있으며, 광범위한 설계문제에 효과적으로 적용 할 수 있는 일반적인 방법이다. 본 연구에서는 APDL을 이용한 부분문제 근사법을 통하여 복합재 압력용기 스킨트 최적화 해석에 적용하였다.

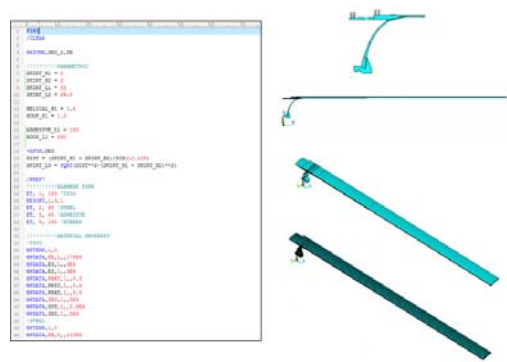


Fig. 3 The batch codes of optimum design analysis using APDL

3.2 스킨트 치수 최적화 해석 - 변위 최소화(Phase 1)

복합재 압력용기 스킨트 치수 최적화 해석을 위한 설계변수는 Fig. 3과 같이 스킨트 두께(H_1)와 스킨트 시작 부위를 기준으로 추가된 원통부 길이(L_1), 스킨트 길이(L_2)로 선정하였다. 복합재 압력용기의 초기 모델은 스킨트 두께(H_1)가 3mm, 원통부 길이(L_1)이 35mm 그리고 스킨트 길이(L_2)는 26.5mm로 설계되었으며, 설계변수의 범위는 스킨트 두께는 ± 1 mm, 원통부 길이(L_1)과 스킨트 길이(L_2)는 ± 10 mm로 선정하였다. 복합재 압력용기 내압에 의해 발생하는 변위의 최소화 문제를 정식화하여 나타내면 식 (1)과 같이 표현된다.

스킨트 치수 변화에 따른 복합재 압력용기의 최적화 해석은 기본 설계를 바탕으로 8번의 반복 해석을 수행하여 최적의 스킨트 치수를 도출하였다. 이때, 사용된 최적화 알고리즘은 부분문제 근사법을 사용하였다. Fig. 5는 스킨트 형상 변화에 대한 변위 최적화 해석 결과 그래프를 나타낸다.

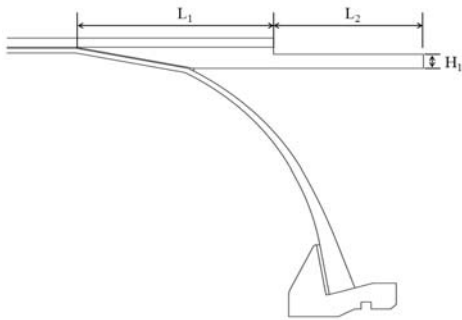


Fig. 4 Design parameters of skirt part

Find{X} (H₁, L₁, L₂)
 Minimize Maximum displacement(D_{max})
 Constraint 2mm ≤ H₁ ≤ 4mm 식 (1)
 25mm ≤ L₁ ≤ 45mm
 16.5mm ≤ L₂ ≤ 36.5mm

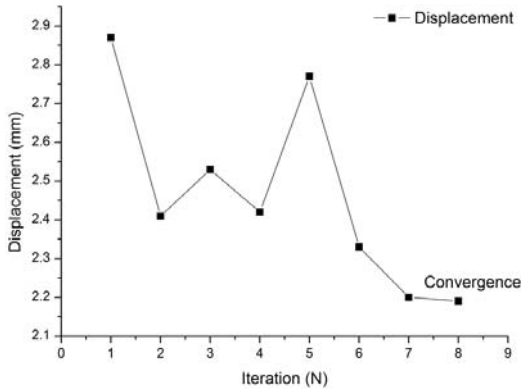


Fig. 5 Results of optimum design analysis(Phase 1)

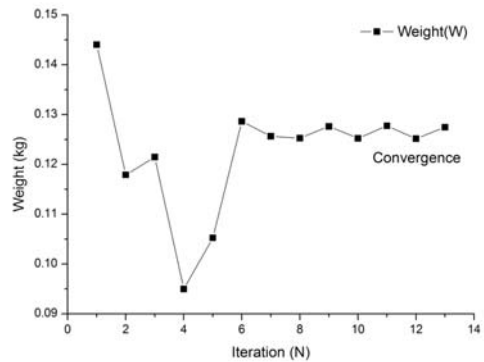
최적화 해석 결과 8번째 해석에서 최대변위 (D_{max})가 2.19mm로 가장 작게 발생함을 확인하였다. 이때, H₁=2.99(3)mm, L₁=31.42mm 그리고 L₂= 36.22mm임을 확인하였다.

3.3 스킨트 치수 최적화 해석 - 무게 최소화(Phase 2)

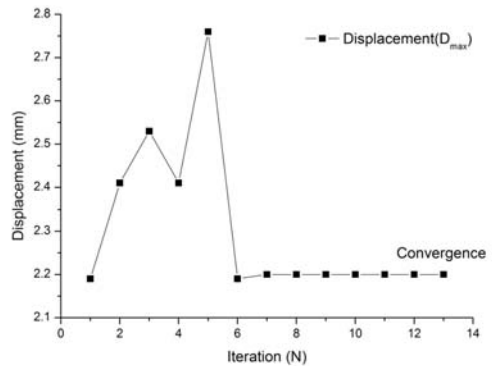
Phase 2에서는 압력용기의 무게를 최소화하는 최적화 해석을 수행한다. 이때, Phase 1에서 도출된 최적화 모델을 초기값으로 하여 해석을 수

행하였으며, Phase 1에서 발생한 변위 결과를 제한조건으로 설정하였다. 설계변수는 Phase 1과 동일하며, 문제를 정식화 하면 식 (2)와 같이 표현된다.

Find{X} (H₁, L₁, L₂)
 Minimize Weight(W)
 Constraint 2mm ≤ H₁ ≤ 4mm 식 (2)
 25mm ≤ L₁ ≤ 45mm
 16.50mm ≤ L₂ ≤ 36.50mm
 Subject to D_{max} ≤ 2.19mm



(a) History of weight



(b) History of displacement

Fig. 6 Results of optimum design analysis(Phase 2)

스킨트 치수 변화에 따른 복합재 압력용기의 무게 최적화 해석은 기본 설계를 바탕으로 총 13번의 해석이 수행되었다. Fig. 6은 무게 최적화 해석 결과 그래프를 보여준다.

최적화 해석 결과 6번째 해석에서 최대변위 (D_{max})가 2.19mm로 상태함수를 만족하며, 가장 경량화된 스커트 치수를 도출하였다. 이때 설계 변수 $H_1=2.99(3)$ mm, $L_1=26.36(26)$ mm 그리고 $L_2= 36.40(36)$ mm임을 확인하였으며, 초기 설계된 스커트 보다 최대 4.38% 경량화된 복합재 압력용기 모델을 도출하였다.

합재 압력용기의 돔 형상 설계 및 성능 평가,” 한국복합재료학회지, 제20권, 제4호, 2007, pp.31-41

4. 결 론

본 연구에서는 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석을 수행하고 이를 바탕으로 최적 설계 모델을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합재 압력용기의 스커트 최적화 해석은 APDL 프로그램 언어를 사용하여 해석의 모든 프로세스를 자동적으로 반영하는 일괄 코딩(batch cording)을 수행하였다.

(2) 복합재 압력용기의 스커트 최적화는 부분 문제 근사방법을 적용하였으며, 내압으로 인해 발생하는 변위를 최소화 하였다. 또한, 무게 최적화 해석을 재수행하여 4.38% 경량화된 모델을 도출하였다.

(3) 본 연구에서 수행한 복합재 스커트 최적화 해석 방법은 복합재 압력용기의 설계에 대한 기초자료로 사용 가능 하며, 또한 다양한 최적화 해석에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강상국, 김명곤, 김철웅, 김천곤, “준축지배적 알고리즘을 이용한 타입 3 복합재 압력용기의 최적설계 프로그램 개발,” 한국복합재료학회지, 제21권, 제1호, 2008, pp.1-7
2. 최영기, 신광복, 김원훈, “토리구형 돔 형상을 갖는 연소관의 치수 최적화 설계 연구,” 대한기계학회 논문집 A권, 제34권, 제5호, 2010, pp.567-573
3. 황태경, 박재범, 김형근, 도영대, 문순일, “복