

복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 설계 연구

김준환* · 신광복**† · 황태경***

* 한밭대학교 기계설계공학전공, ** 한밭대학교 기계공학과, *** 국방과학연구소

Study of Size Optimization for Skirt Structure of Composite Pressure Vessel

Jun Hwan Kim*, Kwang Bok Shin**† and Tae Kyung Hwang***

* Graduate School of Mechanical Design Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

*** Agency for Defense Development

(Received June 26, 2012 ; Revised September 17, 2012 ; Accepted September 19, 2012)

Key Words: Composite Pressure Vessel(복합재 압력용기), Optimum Design(최적설계), Size Optimization(치수 최적화), Sub-problem Approximation Method(부분문제 근사법), Skirt Structure(스커트 구조물)

초록: 본 연구의 목적은 최적화 해석 기법을 이용하여 복합재 압력용기의 스커트 치수를 도출하는 것이다. 복합재 압력용기 스커트 최적화 해석은 부분문제 근사법을 사용하였으며, APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 해석의 모든 과정을 일괄처리하였다. 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.

Abstract: This study aims to find the optimal skirt dimensions for a composite pressure vessel with a separated dome part. The size optimization for the skirt structure of the composite pressure vessel was conducted using a sub-problem approximation method and batch processing codes programmed using ANSYS Parametric Design Language (APDL). The thickness and length of the skirt part were selected as design variables for the optimum analysis. The objective function and constraints were chosen as the weight and the displacement of the skirt part, respectively. The numerical results showed that the weight of the skirt of a composite pressure vessel with a separated dome part could be reduced by a maximum of 4.38% through size optimization analysis of the skirt structure.

1. 서 론

필라멘트 와인딩(filament winding) 공법으로 제작되는 압력용기는 하중 전달방향으로 섬유를 집중적으로 보강함으로써 섬유강화 복합재(fiber reinforced composite)의 장점을 극대화한 구조물이다.⁽¹⁾ 이러한 필라멘트 와인딩 구조물은 1950년대부터 로켓의 모터케이스와 압력용기에 적용되었으며, 1960년대부터는 섬유의 와인딩 패턴을 결정하기 위한 연구가 진행되었다. 이에, 등장력 돔 설계(isotensoid dome design), 평면 와인딩 돔 설계

(planar wound dome design) 그리고 와인딩의 안정성에 기반을 둔 설계(modified geodesic isotensile dome design) 등의 필라멘트 와인딩 설계기법이 제시되었다.^(2~4)

이런 압력용기의 중량은 제품 성능의 중요한 요인이며, 압력용기의 경량화를 통해 추진체의 탑재량 증가, 성능 향상 등의 이점이 있어 경량화에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다.⁽⁵⁾ 최영귀 등⁽⁶⁾은 연소관의 안전계수에 따른 최적화 해석을 통해 경량화 모델을 도출하였으며, 황태경 등⁽⁷⁾은 복합재 압력용기의 돔 형상에 따른 압력 용기의 성능을 평가하였다. C.C. Liang 등⁽⁸⁾은 압력용기의 성능계수(performance factor)를 목적함수로 하는

† Corresponding Author, shin955@hanbat.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

최적화 돔 형상 설계 방법을 제시하였고, Lei Zu 등⁽⁹⁾은 폴라 오픈링(polar opening)의 크기가 다른 필라멘트 와인딩 압력용기 설계에 대한 연구를 하였다.

필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 압력용기의 기존 연구들은 대부분 돔의 형상 설계 및 와인딩 각도 설계를 통한 성능의 최적화 연구가 진행되어왔다. 이에, 사용 목적에 따른 복합재 압력용기의 다양한 돔 형상과 원통부의 최적화 설계가 가능해졌으나, 압력용기를 구성하는 부수구조물 및 스커트 등에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

압력용기에 적용된 스커트는 추력에 의한 축하중의 대부분을 지지하는 역할을 하며, 모터 케이스 조립을 통해 부하를 전달하기 위해 설치된다. 또한, 스커트는 경량화 연구를 통해 전체 중량을 감소시키고 추진체계의 성능을 향상 시킬 수 있는 잠재적인 요소이다. 본 연구에 적용된 복합재 압력용기는 기존 일체형 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기와 달리, 돔부와 원통부가 각각 따로 제작되어 접합되는 분리형 구조로써, 스커트는 돔과 원통부의 분리현상을 방지하는 중요한 기능을 한다.

따라서, 본 연구에서는 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석을 통해 경량화된 스커트 설계기법에 대해 연구를 수행하였다. 이때, 설계변수는 스커트의 길이와 두께로 선정하였으며, 내압에 의해 발생하는 변위와 스커트 무게를 각각 목적함수로 하여 단계별 최적화 해석을 수행하였다. 또한, 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석의 모든 프로세스는 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용한 일괄작업 파일(batch file)을 통해 수행하였다.

2. 본 론

2.1 복합재 압력용기의 구성

본 연구에 적용된 복합재 압력용기는 내압에 의한 원주방향 하중을 담당하는 원통부와 내압에 의한 축방향 하중을 담당하는 돔 그리고 추력에 의해 발생하는 축하중을 지지하는 스커트로 구성된다. 이때, 돔, 원통부 그리고 스커트는 각각 따로 제작하여 접합하는 분리형 구조를 갖고 있다. 이는, 기존의 일체형으로 제작되는 복합재 압력용기에 비하여 비교적 취약한 구조를 가지므로 스커트 구조물을 적용함으로써 추력에 의한 축하중을 지지하는 역할뿐만 아니라 내압에 의한

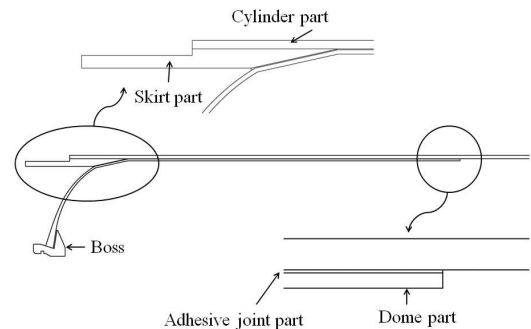


Fig. 1 Configurations of a composite pressure vessel

돔과 원통부의 분리현상을 방지하고자 하였다. 이러한 형태의 압력용기는 Anthony A Yurko,⁽¹⁰⁾ Francis Mard⁽¹¹⁾ 등에 의해 연구된 사례가 있으며, 구조 및 열특성을 만족하는 것으로 확인되었다. 또한, 접착체결을 통해 화약 둔감화(Insensitive munitions) 특성을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

복합재 압력용기에 적용된 소재는 T800 탄소섬유가 적용되었으며, 돔과 원통부 결합은 FM73을 사용하여 접착체결 되어있다. Fig. 1은 복합재 압력용기의 구성을 보여준다.

2.2 복합재 압력용기의 유한요소 모델링

복합재 압력용기의 구조안전성 평가는 상용유한요소 해석프로그램인 ANSYS ver.12를 사용하여 수행하였다. 이때, 복합재 압력용기의 복합재 부분은 3차원 적층 솔리드 요소 Solid 46(3D layered structural solid)을 사용하였으며, 접착부와 보스부는 3차원 솔리드 요소 Solid 45(3D structural solid)를 적용하였다. 복합재 압력용기의 유한요소 모델은 해석의 단순화를 위해 압력용기의 전방부 2°만을 고려한 순환대칭(cyclic symmetry) 모델을 적용하였다. Fig. 2는 복합재 압력용기의 유한요소 모델링을 나타낸다.

필라멘트 와인딩 기법으로 제작되는 복합재 압력용기의 돔은 와인딩되는 섬유층의 적층 두께와 각도가 자오선을 따라 변화된다. 이는, 와인딩되는 섬유의 단면적이 일정하고 와인딩 된 섬유가 등장력이라는 가정하에 식 (1)과 (2)를 통해 돔의 임의 위치에서의 적층 두께와 와인딩 각도를 도출할 수 있다.⁽¹²⁾ 이에, APDL을 이용하여 섬유의 와인딩이 진행됨에 따라 변화되는 복합재 두께 및 와인딩 각도를 자동으로 계산할 수 있는 일괄작업 파일을 코딩(coding)하였으며, 복합재 압력용기 모델에 자동적으로 부여되도록 하였다.

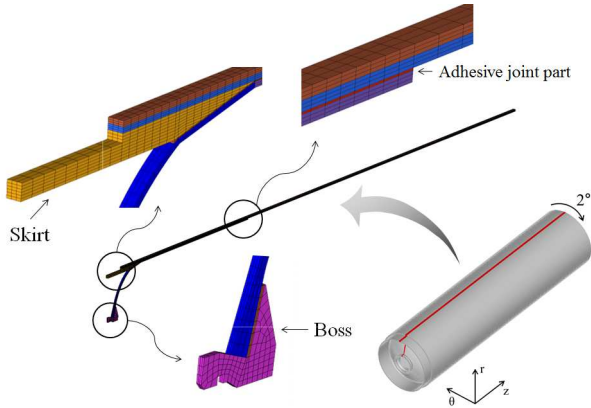


Fig. 2 Finite elements models for a composite pressure vessel

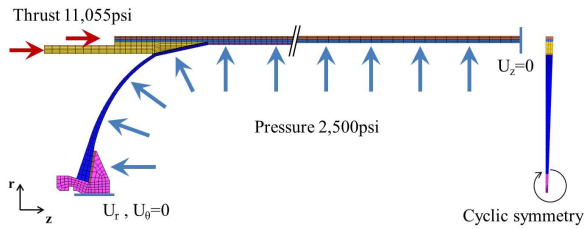


Fig. 3 Boundary and load conditions for structural analysis

$$\alpha_i = \pm \sin^{-1} \frac{r_o}{r_i} \quad (1)$$

$$t_i = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r_i \cos \alpha_i} \times t_c \quad (2)$$

여기서, α 는 적층각도, t 는 두께를 나타내며, 아래첨자 i 는 돔의 임의의 지점, o 는 오프닝 그리고 c 는 원통부를 의미한다.

Fig. 3은 복합재 압력용기의 구조해석을 위한 경계 및 하중조건을 나타낸다. 복합재 압력용기의 경계조건은 모델링 단면에 순환대칭 조건을 부여하였으며, 원통부 끝단은 압력용기 길이방향(z -axis)에 대한 대칭 경계 조건을 부여하였다. 또한, 금속 보스 끝단은 반경 및 각도 방향의 변위($U_r, U_\theta=0$)를 고정하고 축방향 하중을 분포 하중으로 변환하여 금속 보스 끝단에 적용하였다. 이때, 금속 보스와 복합재 돔 간의 절점 공유를 하지 않음으로써 상대 변형을 허용하였다. 압력용기의 하중조건은 내압 2,500psi와 스커트에 추력 11,055psi를 적용하였으며, 적용된 복합재 압력용기의 물성은 Table 1과 같다.

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

Properties		T800 carbon/Epoxy Composite	Steel	FM 73
Elastic Modulus(GPa)	E_1	174	210	2.4
	E_2	9		
	E_3	9		
Shear Modulus(GPa)	G_{12}	5	-	-
	G_{13}	5		
	G_{23}	2.5		
Poisson's ratio	ν_{12}	0.3	0.3	0.45
	ν_{13}	0.3		
	ν_{23}	0.4		

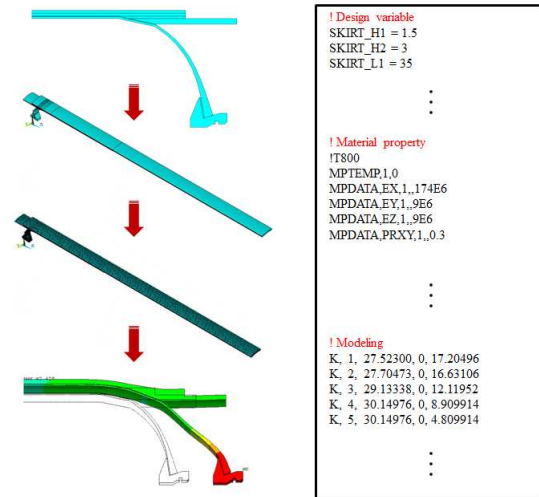


Fig. 4 The batch process of optimum design using APDL

3. 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석

3.1 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석 프로세스

복합재 압력용기의 스커트 형상의 최적화 해석은 다음 세 단계를 통해 최적의 스커트 치수를 도출하였다.

- ① 복합재 압력용기의 초기 모델에 대한 구조 안전성 평가를 수행하여 안전여부 판단
- ② 돔과 원통부의 분리현상 방지를 위하여 내압에 의해 발생하는 변위를 최소화하는 스커트 치수 도출

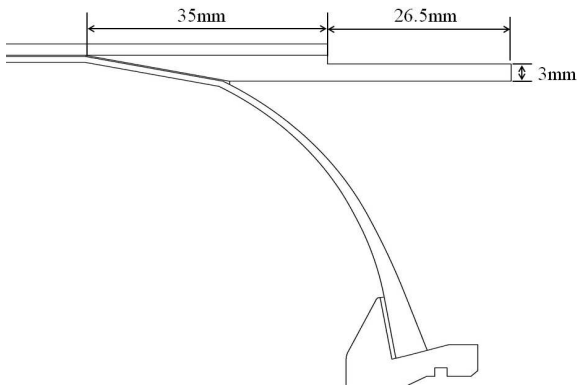


Fig. 5 The dimension of skirt for initial composite pressure vessel design

③ 두 번째 단계에서 도출된 최소 변위를 제약조건으로 하고, 스커트 무게를 목적함수로 하는 스커트 치수 최적화 해석 수행

최적화 해석은 APDL로 작성된 로그파일(log file)을 사용하여 모든 해석 프로세스를 일괄처리(batch processing)하였다. 이때, 로그파일은 Fig. 4와 같이 압력용기의 치수, 물성, 하중조건 등을 매개 변수화하였으며, 압력용기의 모델링, 유한요소 모델링, 해석이 자동으로 수행되도록 작성하였다.

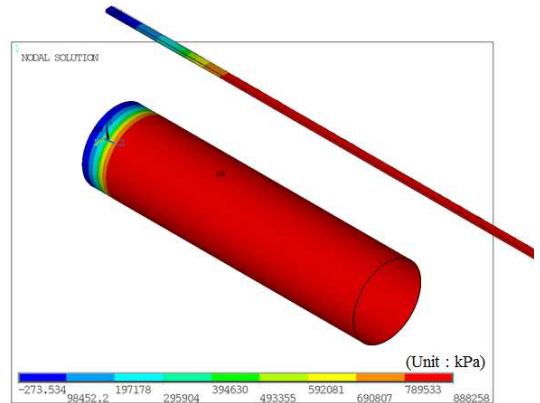
3.2 복합재 압력용기 초기모델의 구조해석 결과(Phase 1)

최적화 해석을 수행하기 이전에 복합재 압력용기의 초기설계에 대한 구조안전성을 미리 평가할 필요가 있다. 이때, 초기 스커트 설계는 경험적으로 적용되고 있는 설계 방법이 사용되었다. Fig. 5는 복합재 압력용기의 초기 설계에 대한 스커트 설계치수를 보여준다.

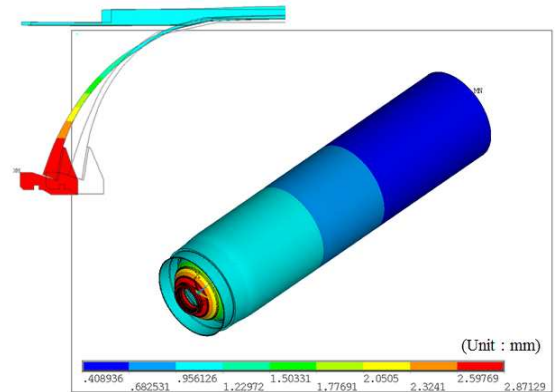
복합재 압력용기의 구조해석 결과 연소관의 원통부에서 섬유가 와인딩된 방향으로 최대 888MPa이 발생하여, 파손응력인 2,815MPa 이내로 구조강도 조건을 만족함을 확인하였다. 이때, 발생한 최대 변위는 보스부에서 2.87mm 발생하였다. Fig. 6의 (a)는 복합재 압력용기의 전체모델과 원통부 단면의 응력결과를 나타내며, (b)는 복합재 압력용기의 전체모델과 전방부 단면형상의 변위결과를 나타낸다.

3.3 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석 알고리즘

복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석 알고리즘은 부분문제 근사법을 통해 수행되었다.



(a) Stress results



(b) Displacement results

Fig. 6 The results of structural analysis of a composite pressure vessel

이는 도함수가 아닌 오직 종속변수의 값을 필요로 하는 영계법(zero-order method)의 발전된 형태로서 광범위한 설계문제에 효과적으로 적용할 수 있는 일반적인 방법이다.⁽¹³⁾

스커트 치수 최적화 해석은 초기 압력용기의 설계 변수를 입력받아 돔 부위의 두께와 적층각이 자동으로 계산되어 유한요소 모델링에 적용된다. 이후, 복합재 압력용기의 구조해석을 바탕으로 부분문제 근사법을 통해 스커트 치수 최적화가 수행된다. Fig. 7은 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석 알고리즘을 나타낸다.

3.4 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석

3.4.1 복합재 압력용기의 변위 최소화(Phase 2)

복합재 압력용기 스커트 치수 최적화 해석을 위한 설계변수는 Fig. 8과 같이 스커트 두께(H_1)와 스커트 길이(L_1 , L_2)로 선정하였으며, APDL을 이용하여 파라메트릭 설계(parametric design)를 수

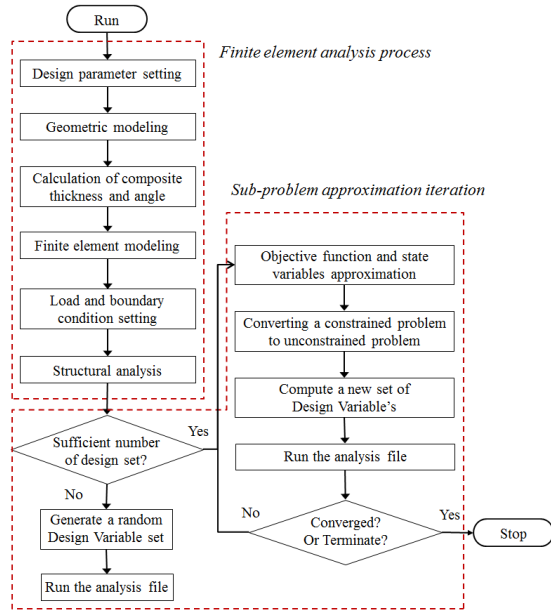


Fig. 7 The algorithms of optimum design using sub-problem approximation method

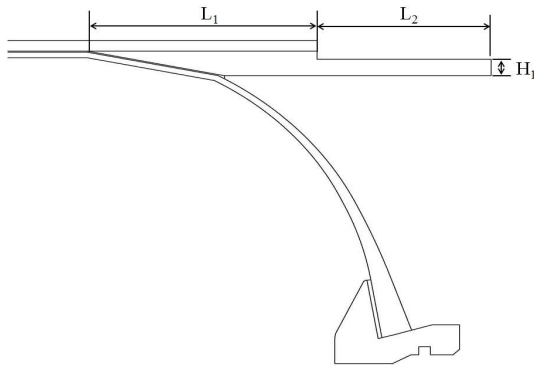


Fig. 8 Optimum design parameters of skirt

행하였다.

Phase 2에서는 돔과 원통부의 접착체결로 인하여 발생하는 분리현상 방지를 위해 내압에 의한 변위를 목적함수로 하여 스커트 치수 최적화를 수행하였다. 이때, 설계변수 범위는 모터 케이스와의 관계를 고려하여 초기 스커트 치수에서 H_1 은 $\pm 1\text{mm}$, L_1 과 L_2 는 $\pm 10\text{mm}$ 로 설계범위를 선정하였다. 복합재 압력용기 내압에 의해 발생하는 변위 최소화 문제를 정식화하여 나타내면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && (H_1, L_1, L_2) \\
 &\text{Minimize} && \text{Maximum displacement}(D_{\max}) \\
 &\text{Constraint} && 2\text{mm} \leq H_1 \leq 4\text{mm} \\
 & && 25\text{mm} \leq L_1 \leq 45\text{mm} \\
 & && 16.5\text{mm} \leq L_2 \leq 36.5\text{mm}
 \end{aligned} \quad (3)$$

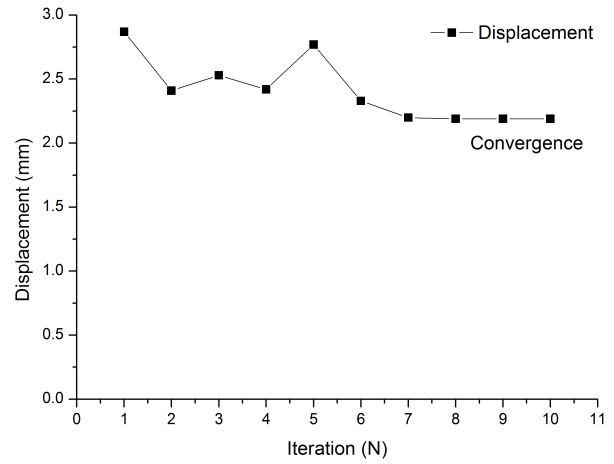


Fig. 9 The results of optimum design analysis for Phase 2

스커트 치수 변화에 따른 복합재 압력용기의 최적화 해석은 초기 설계를 바탕으로 최적화 해석을 수행하였다. Fig. 9는 Phase 2에서의 스커트 치수 최적화 해석 결과를 나타낸다. Phase 2에서의 최적화 해석 결과 8번째 반복수행 단계에서 최대변위(D_{\max})가 2.19mm로 가장 작게 나타났으며, 이때 스커트 치수는 $H_1=2.99(3)\text{mm}$, $L_1=31.42(31)\text{mm}$ 그리고 $L_2=36.22(36)\text{mm}$ 임을 확인하였다.

3.4.2 복합재 압력용기의 무게 최소화(Phase 3)

Phase 3에서는 압력용기 복합재 스커트의 무게를 최소화하는 단계이다. 이때, Phase 2에서 발생한 변위 결과를 제한조건으로 설정하였다. 설계변수는 Phase 2와 동일하며, 최적화 문제를 정식화하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && (H_1, L_1, L_2) \\
 &\text{Minimize} && \text{Skirt Weight}(W) \\
 &\text{Constraint} && 2\text{mm} \leq H_1 \leq 4\text{mm} \\
 & && 25\text{mm} \leq L_1 \leq 45\text{mm} \\
 & && 16.5\text{mm} \leq L_2 \leq 36.5\text{mm} \\
 & && D_{\max} \leq 2.19\text{mm}
 \end{aligned} \quad (4)$$

스커트 치수 변화에 따른 복합재 압력용기의 무게 최적화 해석은 Phase 2의 스커트 최적화 치수를 바탕으로 총 15번의 해석이 반복 수행되었다. 이때, 6번째 반복수행 단계에서 제한조건을 만족하면서, 가장 경량화된 스커트 치수가 도출되었다. Fig. 10은 Phase 3에서의 스커트 치수 최적화 해석 결과를 나타낸다. 이때, 설계 변수 $H_1=2.99(3)\text{mm}$,

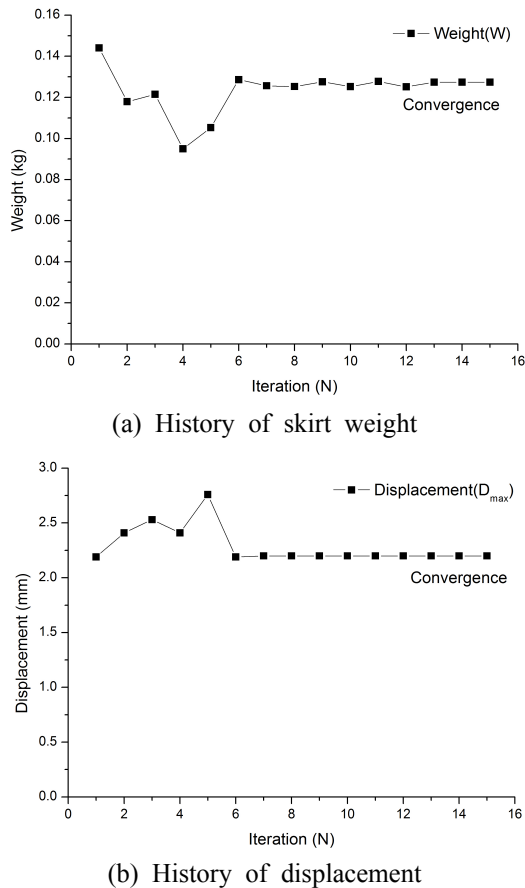


Fig. 10 The results of optimum design analysis for Phase 3

$L_1=26.36(26)\text{mm}$ 그리고 $L_2=36.40(36)\text{mm}$ 임을 확인하였으며 초기 설계된 스커트 치수보다 최대 4.38% 경량화된 복합재 압력용기 모델을 도출하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 돔 분리형 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석을 수행하고 이를 바탕으로 최적설계 모델을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합재 압력용기의 스커트 치수 최적화 해석은 부분문제 근사법을 사용하였으며, 모든 해석 프로세스는 APDL을 사용하여 복합재 압력용기의 형상과 설계변수 등의 치수 변화를 자동으로 해석 과정에 반영되는 일괄작업 파일을 작성하여 수행되었다. 또한, 최적화 해석은 주어진 하중 조건에 변위 최소화과 무게 경량화를 위해 두 단계로 나누어 진행되었다. 첫 번째 단계에서는

스커트 구조물의 최적 치수를 얻기 위해 변위를 목적함수로 설정하여 해석을 수행하였으며, 두 번째 단계에서는 스커트 무게 경량화를 위해 첫 번째 최적화 단계에서 얻은 스커트 변위를 제한 조건으로 설정하여 최적화 해석을 재수행하였다.

(2) 두 단계의 스커트 치수 최적화 해석을 통해 스커트 두께 H_1 은 초기모델과 동일한 3mm가 도출되었으나, 스커트 길이 L_1 은 35mm에서 26.36mm로 약 9mm 감소하였으며, 스커트 길이 L_2 는 26.5mm에서 36.4mm로 약 9.5mm 증가하는 최적화 결과를 얻었다. 이는, 초기모델에 비해 동일한 하중조건에서 약 0.7mm의 변위를 감소시키면서 추가로 4.38%의 경량화된 복합재 압력용기를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

(3) 스커트 치수 최적화 및 분리형 구조설계를 통하여 초기 설계모델에 비해 우수한 구조적 성능을 확보하면서, 추가적으로 경량화 효과를 갖는 복합재 압력용기 스커트 구조물의 치수 최적화 설계기법을 제시하였다. 이 방법을 통해 얻어진 복합재 압력용기의 경량화는 추진제 탑재량 증가와 비행거리 향상 등의 이점이 있어 복합재 압력용기의 성능향상과 설계 완성도를 높이는 데 기여할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제 “돔 분리형 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 체결부 설계 및 파손 메카니즘 연구”의 지원으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Park, J. S., Kim, H. K., Kim, C. U., Hwang, T. K., Hong, C. S. and Kim, C. G., 2001, "Behavior Analysis and Strain Measurement of the Filament Wound Composite Tank Part I. Finite Element Analysis of the Filament Wound Tank," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 29, No. 7, pp. 49~55.
- (2) Zickel, J., 1962, "Isotensoid Pressure Vessel," *ARS Journal*, Vol. 32, No. 6, pp. 950~951.
- (3) Doh, Y. D. and Hong, C. S., 1995, "Progressive Failure Analysis for Filament Wound Pressure Vessel," *Journal of Reinforced Plastics and*

- Composites*, Vol. 14, No. 12, pp. 1278~1306.
- (4) Hartung, R. F., 1963, "Planar-wound Filamentary Pressure Vessels," *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 12, pp. 2842~2844.
- (5) Lee, Y. S., Cho, W. M., Lee, B. E. and Koo, S. H., 1993, "Nonlinear Stress Analysis of Pressure Vessel for Various Dome Shape and Thickness," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 17, No. 10, pp. 2634~2645.
- (6) Choi, Y. G., Shin, K. B. and Kim, W. H., 2010, "A Study on Size Optimization of Rocket Motor Case using the Modified 2D Axisymmetric Finite Element Model," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 6, pp. 901~907.
- (7) Hwang, T. K., Park, J. B., Kim, H. G., Doh, Y. D. and Moon, S. I., 2007, "Dome Shape Design and Performance Evaluation of Composite Pressure Vessel," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, pp. 31~41.
- (8) Liang, C. C., Chen, H. W. and Wang, C. H., 2002, "Optimum Design of Dome Contour for Filament Wound Composite Pressure Vessels based on a Shape Factor," *Composite Structures*, Vol. 58, No. 4, pp. 469~482.
- (9) Zu, L., Koussios, S. and Beukers, A., 2010, "Design of Filament-wound Isotensoid Pressure Vessels with Unequal Polar Openings," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, pp. 2307~2313.
- (10) Yurko, A. A. and Esslinger, J. R., 2005, "Affordable High Performance Composite Case Rocket Motor Manufacturing," 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference.
- (11) Mard, F., 1993, "Design, Manufacture and Test of the Composite Case for ERINT-1 Solid Rocket Motor," 29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference.
- (12) Kim, C. U., Park, J. S., Hong, C. S. and Kim, C. G., 2000, "Analysis of Filament Wound Pressure Tank Considering Winding Angle Variation In Thickness Direction," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 13, No. 2, pp. 51~59.
- (13) ANSYS Training Manual 12.0, 2009.