

복합재 압력용기의 성능지수 최대화를 위한 적층 설계변수 연구

정승민*[†] · 황태경*

Research on Laminate Design Parameters to Maximize Performance Index of Composite Pressure Vessel

Seungmin Jeong*[†] · Taekyung Hwang*

ABSTRACT

In this paper the laminate design parameters are researched to maximize the performance index of a composite pressure vessel. The pressure-resistant performance and the light-weight concept with contained internal space are implied in the performance index. To maximize the performance index, the three design variables that the thickness of each of helical and hoop layers and the length of hoop layer are considered under the assumption of fixed internal space. To optimize the variables, the response surface method is introduced for construction of the surrogate model and the ANOVA(analysis of variance) is performed to evaluate the effects of the variables. The optimization problem is formulated to maximize performance index under the burst pressure constraint. To verify the effectiveness of the research, numerical analyses are performed for the optimum model.

초 록

본 연구에서는 복합재 압력용기의 성능지수를 최대화하기 위한 적층 설계변수의 영향도 평가 및 최적설계를 수행하였다. 복합재 압력용기의 성능지수에는 용기의 내부체적을 포함한 내압성능 및 경량화 개념이 함축되어 있다. 따라서 성능지수를 최대화하기 위하여 압력용기의 내부체적이 고정되어 있다는 가정 하에 헬리컬 및 후프 층의 두께와 후프 층의 길이, 총 세 가지 변수를 고려하였다. 선정된 변수들의 최적화를 위하여 대체모델의 구축에 필요한 반응표면법이 도입되었고, 변수의 영향도를 평가하기 위한 분산분석이 수행되었다. 최적설계 문제는 내압성능 제약조건 하에 성능지수를 최대화하는 문제로 정식화하였다. 도출된 최적화 모델에 대한 추가적인 수치해석을 통해 본 연구의 효용성을 입증하였다.

Key Words: Composite Pressure Vessel(복합재 압력용기), Performance Index(성능지수), Response Surface Method(반응표면법), Optimization(최적설계)

* 국방과학연구소

[†] 교신저자, E-mail: tidakss@naver.com

섬유강화 복합재 압력용기(fiber reinforced composite pressure vessel)는 일반적인 등방성 금속재 압력용기와는 달리 이방성 복합재를 이용하기 때문에 압력용기의 축방향 및 원주방향에 대한 효율적인 적층설계(laminate design)를 통해 무게 대비 내압성능(pressure-resistance performance)의 극대화가 가능하다[1]. 이 때 압력용기의 내압성능에 영향을 주는 주요 인자는 돔 부 헬리컬 층(helical layer)과 실린더 부 후프 층(hoop layer)의 두께이다[2]. 일반적으로 압력용기의 설계시 요구 성능으로서 내부체적(internal volume)과 내압성능, 그리고 오픈닝(opening)이 주어지므로 금속 라이너(metal liner)의 직경과 설계기준에 따른 돔 형상(dome contour)이 우선적으로 결정된다[3]. 따라서 내압성능에 큰 영향을 주는 헬리컬 층과 후프 층의 두께는 압력용기 설계시 주요 변수가 된다. 그리고 금속 라이너를 포함하는 대부분의 복합재 압력용기의 경우, 후프 층은 실린더와 돔의 접선부를 약간 지나서 돔 부의 일부까지 적층을 함으로써 낮은 내압에서의 접선 부 파열을 방지하게 된다[4]. 반면 헬리컬 층과 후프 층의 두께에 따른 금속 라이너 복합재 압력용기의 내압에 의한 변형 거동 및 파열모드의 변화에 대한 연구는 지금까지 다수 이루어졌지만[5,6], 접선 부를 중심으로 한 후프 층의 길이에 따른 고찰에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

한편 복합재 압력용기의 내압성능 및 무게, 내부체적과 같은 주요 성능들을 포괄하는 기준인 성능지수(performance index)를 최적화하기 위한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다[7]. 또한 선행 연구에서 반응표면법(response surface method)을 이용한 대체모델 기반 최적설계 기법을 도입하여 복합재 연소관의 다양한 성능들을 동시에 고려한 금속 보스의 형상 최적설계를 수행한 사례가 있다[8].

본 논문에서는 복합재 압력용기의 성능지수를 최대화하기 위한 적층 설계변수의 영향도 평가 및 최적설계를 수행하였다. 복합재 압력용기의 적층설계에 있어서 헬리컬 층과 후프 층의 두께 뿐만 아니라 실린더와 돔의 접선 부를 기준으로

한 후프 층의 길이까지 설계변수로 고려하였다. 선정된 변수들의 최적화를 위하여 반응표면법을 이용해 대체모델(surrogate model)을 구축하였고, 변수의 영향도를 평가하기 위해 분산분석을 실시하였다. 구축된 반응표면모델(response surface model, RSM)을 이용하여 내압성능 제약 조건 하에 성능지수를 최대화하였다. 그리고 도출된 최적화 모델에 대한 수치해석을 수행함으로써 본 연구의 효용성을 입증하였다.

2. 대체모델 구축

2.1 설계변수 선정 및 해석조건

복합재 압력용기의 성능지수를 최대화하기 위하여 헬리컬 및 후프 층의 두께와 후프 층의 길이, 총 세 가지의 설계변수를 선정하였다. 이 때 금속 라이너의 형상 및 내부체적, 그리고 헬리컬 적층 각도는 고정되어 있다고 가정하였다. Fig. 1은 설계변수와 대체모델 구축을 위한 해석조건을 나타낸다. Fig. 1의 해석모델은 내압하중 하에서 알루미늄 라이너의 형상이 고정되어 있으며, 그 위로 헬리컬 층과 후프 층이 순서대로 적층되어 있는 구조이다. 이 때 헬리컬 층은 알루미늄 라이너의 돔 부까지 적층되지만, 후프 층은 실린더 부와 돔 부가 만나는 접선 부를 기준으로 후프 층의 길이(L_{hoop})가 정의된다. 따라서 설계변수는 후프 층과 헬리컬 층의 두께(T_{hoop} , $T_{helical}$), 그리고 후프 층의 길이(L_{hoop})가 된다.

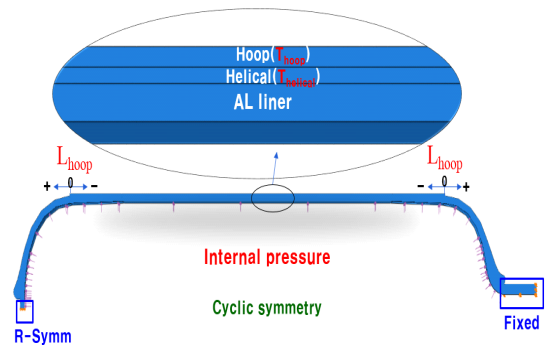


Fig. 1 Design variables and analysis condition.

해석 모델링을 위하여 유한요소해석 상용 프로그램인 ABAQUS 6.12를 이용하였으며, 해석시간의 단축을 위하여 순환대칭 모델(cyclic symmetry model)을 사용하였다. 그리고 해석 모델링에 사용된 유한요소는 2차 육면체 요소(quadratic hexahedral element)가 사용되었다.

2.2 실험계획법

Fig. 1과 같은 해석조건 하에서 총 세 가지 변수들(T_{hoop} , $T_{helical}$, L_{hoop})에 대해 반응표면법의 중심합성계획(central composite design)을 이용하여 Table 1과 같이 실험점을 추출한 후 해석 결과를 도출하였다. 이 때 해석 결과는 파열압(P)과 복합재 무게(W), 그리고 파열압과 복합재 무게와의 비인 성능지수(P/W)가 된다. 실험횟수는 기준 모델(baseline model)을 포함하여 총 15회가 되며, 기준 모델은 실제로 사용되어온 설계값이다. 따라서 본 실험계획은 기준 모델 대비 타 실험의 비교, 분석이 용이하도록 계획되었다.

Table 1. Central composite design with experimental results.

	T_{hoop}	$T_{helical}$	L_{hoop}	P	W	P/W
Base	1.30	1.04	0	9,000	0.711	12,658
1	0.52	0.52	-20	4,260	0.308	13,831
2	0.52	0.52	20	4,570	0.337	13,561
3	0.52	1.56	-20	4,850	0.676	7,175
4	0.52	1.56	20	4,930	0.705	6,993
5	2.08	0.52	-20	5,740	0.668	8,593
6	2.08	0.52	20	5,740	0.781	7,350
7	2.08	1.56	-20	7,550	1.041	7,253
8	2.08	1.56	20	9,250	1.157	7,995
9	0	1.04	-	2,350	0.375	6,267
10	2.61	1.04	0	9,150	1.057	8,657
11	1.30	0.16	0	3,800	0.397	9,572
12	1.30	1.91	0	9,300	1.013	9,181
13	1.30	1.04	-33.63	4,600	0.650	7,077
14	1.30	1.04	33.63	9,000	0.762	11,811

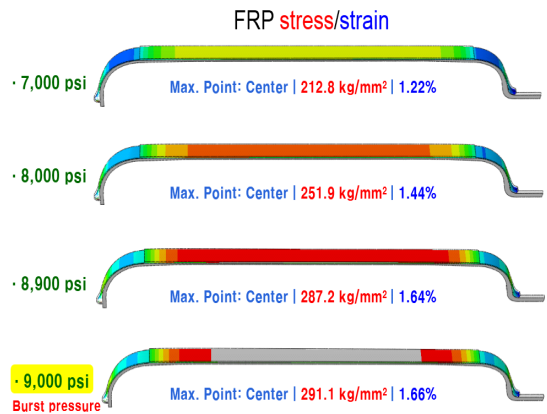
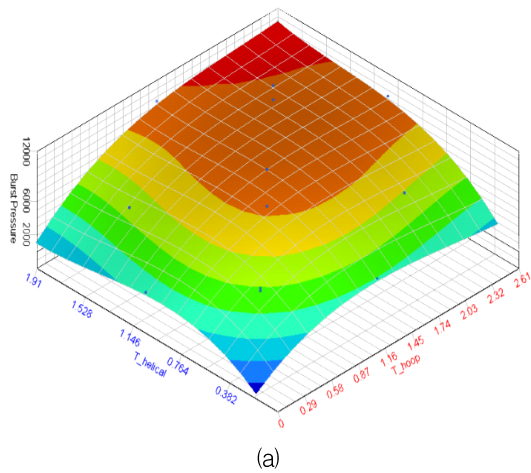


Fig. 2 FRP stress/strain plot of baseline model.

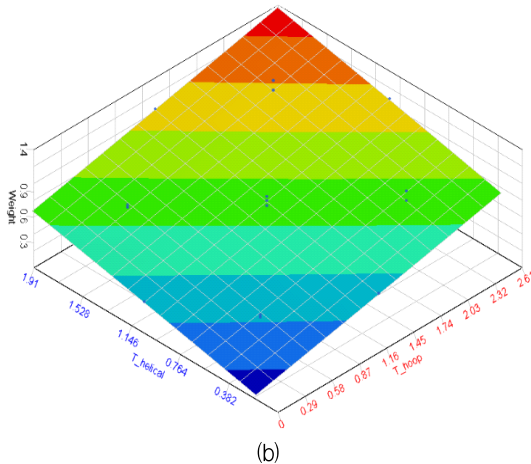
Fig. 2는 기준 모델의 복합재 응력 및 변형률 해석결과를 보여준다. Fig. 2를 통해 9,000 psi의 내압에서 복합재가 파괴강도인 290 kg/mm²에 도달하여 파열되는 것을 볼 수 있다. 또한 기준 모델의 경우 파손위치가 실린더 부 중앙임을 확인할 수 있다. 이때 해석 정확도를 위해서 메쉬 크기(mesh size)를 매우 조밀하게 하였고, 모든 해석의 경우에 대해 동일한 메싱을 적용하였다.

2.3 반응표면모델

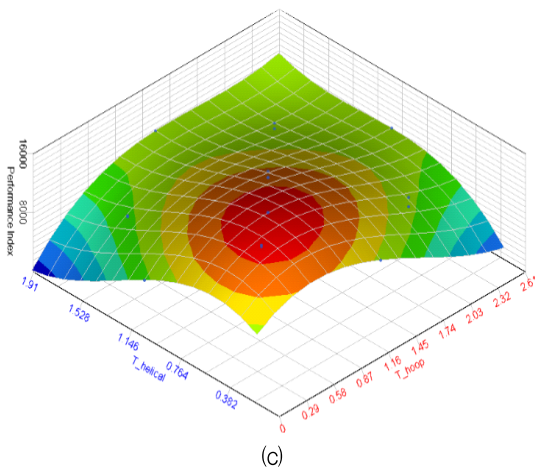
Table 1의 결과로부터 반응표면법을 이용하여 근사최적설계를 위한 반응표면모델을 구축하였다. 파열압 및 무게, 그리고 성능지수 각각에 대한 설계변수의 영향도 평가를 위해 분산분석(analysis of variance)을 실시하였으며, 유의 수준(significance level)을 0.05로 정하여 유의 확률(significance probability)이 0.05보다 작을 경우에 해당 요인이 유의하다고 판별하였다. 따라서 세 가지의 성능값들(P, W, P/W)에 대한 회귀식(regression equation)의 적합성을 위해 유의하지 않은 항(term)들은 오차항(error term)으로 풀링(pooling)하였다. 이 때 회귀식의 적합도는 수정 결정계수(adjusted coefficient of determination)를 이용하였다. 본 논문에서는 총 세 종류의 회귀식에 대한 모델의 설명력을 충분히 확보하기 위해 수정 결정계수가 0.95에 근접하도록 회귀식을 구축하였다. Fig. 3은 총 세 가지의 성능값들에 대해 구축된 반응표면모델들을 보여준다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Response surface models for the results.

Fig. 3(a)는 파열압(P), Fig. 3(b)는 복합재 무게(W), 그리고 Fig. 3(c)는 성능지수(P/W)에 대한 반응표면모델이다. 파열압과 성능지수는 구조물의 응력과 관련이 크며, 특히 파열되는 위치 및 파열압 크기는 설계변수에 따라서 상이하기 때문에 비선형성이 매우 강하여 3차 모델(cubic model)을 사용하였다. 반면에 복합재 무게의 경우는 단순히 구조물의 부피에 비례하기 때문에 비선형성이 약하여 2차 모델(quadratic model)을 사용하였다. 분산분석을 이용하여 반응표면모델을 구축하는 과정은 기존에 수행된 정승민 등[8]의 연구를 참고하였다. Table 2에 성능지수에 대한 최종적인 분산분석 결과를 나타내었다.

Table 2. ANOVA table for performance index

	DF	SS	MS	F	P
T_{hoop}	3	5.31e7	1.77e7	35.19	0.00
$T_{helical}$	3	5.01e7	1.67e7	33.17	0.00
L_{hoop}	3	1.72e7	0.57e7	11.39	0.02
$T_{hoop} \times L_{hoop}$	1	1.96e7	1.96e7	38.99	0.00
Error	4	0.20e7	0.05e7	-	-
Total	14	9.08e7	-	-	-

Table 2를 보면 성능지수에 대하여 후프 층과 후프 층의 길이의 교호작용 인자인 $T_{hoop} \times L_{hoop}$ 가 가장 민감한 요소임을 확인할 수 있다. 이는 후프 층의 두께뿐만 아니라 후프 층의 길이에 따라서 파열위치가 결정되면서 내압성능이 크게 달라지기 때문이다. 따라서 실린더 중앙부에서 파열되는 모드인 경우에는 후프 층의 두께 뿐만 아니라 접선 부를 기준으로 한 후프 층의 길이도 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 반면에 헬리컬 층의 두께도 상당히 큰 민감도를 보임을 확인할 수 있다. 이는 헬리컬 층이 너무 얇아지게 되면 파열되는 위치가 실린더 중앙부가 아닌 돔 부에서 파열이 일어나게 되어 비교적 낮은 내압성능을 나타내기 때문이다. 따라서 헬리컬 층의 두께도 성능지수에 큰 영향을 미치는 요소임을 확인할 수 있다.

3. 대체모델 기반 최적설계

3.1 문제 정식화

복합재 압력용기의 내압성능 제약조건 하에 성능지수를 최대화하기 위한 최적설계 문제 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{find} && T_{\text{hoop}}, T_{\text{helical}}, L_{\text{hoop}} \\ &\text{maximize} && P/W \\ &\text{subject to} && P \geq P^* \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. 1에서 P 는 파열압, W 는 복합재 무게이며 P^* 는 특정 내압성능이다. 본 연구에서는 제안된 최적설계 기법의 효율성을 검증하기 위하여 P^* 값을 기준 모델의 값인 9,000 psi와 이보다 더 작은 값인 8,000 psi, 총 두 가지 경우에 대하여 최적설계를 수행하였다. 따라서 최적설계는 특정 내압성능을 보장하면서 성능지수(P/W)를 최대화하는 후프 층 및 헬리컬 층의 두께, 그리고 후프 층의 접선 부로부터의 길이를 찾는 문제로 정식화된다.

3.2 최적설계 알고리즘

구축된 대체모델은 세 가지 변수로 이루어진 2차 또는 3차 다항식으로 구성되었다. 따라서 다수의 비선형 다항식에 대해 탁월한 성능이 검증된 순차이차계획법(SQP)를 이용하여 최적화를 진행하였으며, 이를 위해 MATLAB optimization toolbox를 이용하였다. 최적화 결과는 변수의 초기값에 대한 영향이 크기 때문에, 선정된 변수들의 범위 내에서 각 변수들의 다양한 초기값을 알고리즘에 적용하였다.

3.3 최적설계 결과

Fig. 4는 특정 내압성능(P^*)의 값이 8,000 psi와 기준 모델과 동일한 9,000 psi일 경우에 대한 최적화 과정을 보여준다. Fig. 4(a)는 특정 내압성능이 8,000 psi일 경우이며, Fig. 4(b)는 9,000 psi일 경우를 나타낸다. 특정 내압성능이 8,000 psi일 경우에는 성능지수가 13,629에 수렴하였으며, 파열압은 정확히 8,000 psi에 도달하였음을 알

수 있다. 마찬가지로 특정 내압성능이 9,000 psi일 경우에는 성능지수는 13,196 psi에 수렴하면서 파열압은 정확히 9,000 psi에 도달하였다. Table 3에 최적화 결과를 요약하였다.

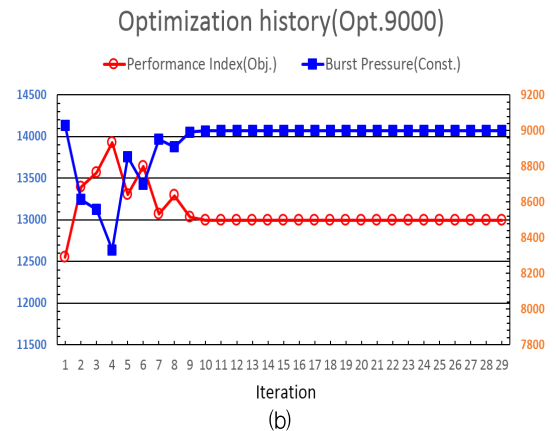
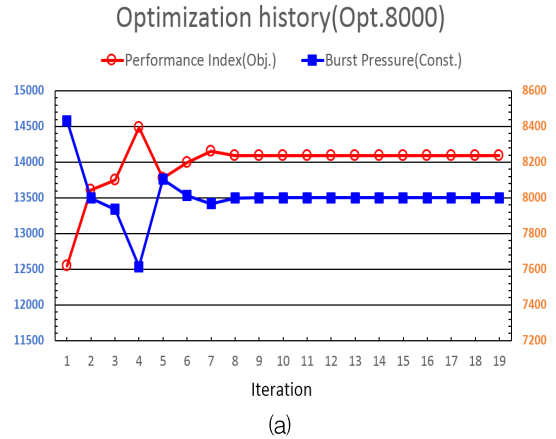


Fig. 4 Optimization history according to burst pressure.

Table 3. Optimization results of RSM.

	Baseline	Opt.8000	Opt.9000	Baseline comparison
T_{hoop}	1.30	1.12	1.31	
T_{helical}	1.04	0.84	0.97	
L_{hoop}	0	-4.78	-4.08	
P	9,000	8,000	9,000	0
W	0.711	0.587	0.682	-4.1%
P/W	12,658	13,629	13,196	+4.3%

Table 3을 보면 성능지수는 특정 내압성능이 8,000일 경우(Opt.8000)가 가장 높음을 알 수 있다. 그리고 기준 모델과 특정 내압성능이 9,000일 경우(Opt.9000)간에 비교한 결과를 보면, 무게는 4.1%가 감소하였고 성능지수는 4.3%가 증가하였다. 설계변수의 변화를 보면, 후프 층의 두께가 0.01mm 증가한 반면 헬리컬 층의 두께는 0.07mm이 감소하였고 후프 층의 길이도 4.08mm이 감소하였다. 이는 압력용기의 원주방향에 대한 응력은 후프 층이 주로 담당한다는 것을 보여주며, 성능지수의 최대화를 위해 헬리컬 층의 두께를 감소시킴으로써 무게를 줄였다는 것을 알 수 있다. 반면에 최적화 경우 둘 다 후프 층의 길이가 약 4~5mm 정도 감소하였다는 것을 알 수 있다. 이는 실린더 중앙부가 파열되기 위한 최소한의 후프 층의 길이가 접선부로부터 약 4~5mm 정도라는 것을 보여준다.

최적화 결과의 검증을 위해 도출된 최적 설계 변수를 이용하여 유한요소해석을 실시하였으며 Fig. 5에 내압 크기에 따른 결과를 나타내었다.

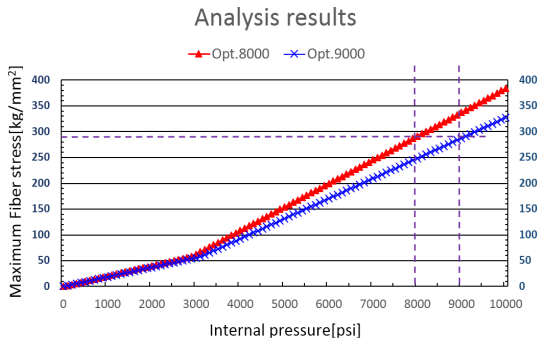


Fig. 5 Analysis results for verification.

Fig. 5를 보면 실제 해석결과에서도 Opt.8000 모델과 Opt.9000 모델이 내압의 크기가 각각 8,000 psi와 9,000 psi에서 복합재 파괴강도인 290 kg/mm²에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 내압의 크기가 약 3,000 psi에서 섬유 응력의 변곡점이 발생하는 이유는 내압에 의해 알루미늄 라이너의 소성변형이 발생하여 구조물의 강성이 변화하였기 때문이다. Table 4에 반응표면모델과 실제 해석결과를 비교하여 정리하였다.

Table 4. Comparison between RSM and Analysis.

	Opt.8000		Opt.9000	
	RSM	Analysis	RSM	Analysis
P	8,000	8,080	9,000	9,050
W	0.587	0.580	0.682	0.673
P/W	13,629	13,931	13,196	13,447
Base P/W comparison	-		+4.3%	+6.2%

Table 4를 보면 각 성능값에 대한 반응표면모델과 해석결과와의 오차가 매우 작은 것을 확인할 수 있다. Opt.9000 모델의 경우, 기준 모델의 성능지수 대비하여 반응표면모델은 4.3%, 실제 해석모델은 6.2% 증가한 결과를 보였다. 최종적으로 Table 4의 결과를 통해 반응표면법을 이용한 대체모델 기반 최적설계의 효용성을 검증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 반응표면법을 이용하여 알루미늄 라이너 복합재 압력용기의 성능지수 최대화를 위한 대체모델 기반 최적설계를 수행하였다. 내압성능의 제약조건 하에서 내압성능에 큰 영향을 미치는 인자인 후프 층과 헬리컬 층의 두께, 그리고 후프 층의 길이를 설계변수로 설정하였다. 최적설계 결과, 기준 모델 대비 성능지수가 반응표면모델의 경우 4.3%, 실제 해석모델의 경우에는 6.2% 증가하였음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 설계변수 최적화로 인한 복합재 압력용기의 성능지수 향상은 구조물이 대형화 될수록 더욱더 크게 나타날 것으로 보인다. 향후, 다양한 부품들에 대한 대체모델 기반 최적설계방법이 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- Schuerch, H., "Analytical Design for

- Optimum Filamentary Pressure Vessels," *AIAA Launch and Space Vehicle Shell Structures Conference*, Apr. 1963.
2. Ger, G.S., Hwang, D.G., Chen, W.Y. and Hsu, S.E., "Design and Fabrication of High Performance Composite Pressure Vessels," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 10, No. 2, pp.157-163, 1988.
 3. Tackett, E.W., Merrell, G.A. and Kulkarni, S.B., "Carbon Pressure Vessel Performance with Changing Dome Profiles," *20th Joint Propulsion Conference*, Brigham City, UT, U.S.A., Jun. 1984.
 4. Gray, D. L. and Moser, D. J., "Finite Element Analysis of a Composite Overwrapped Pressure Vessel," *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Jul. 2004.
 5. Collins, T., "Impact Damage and Residual Strength in Graphite Epoxy, Composite, Metal Lined, Pressure Vessels," *31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Jul. 1995.
 6. Kawahara, G. and McCleskey, S.F., "Titanium-Lined, Carbon Composite Overwrapped Pressure Vessel," *32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Jul. 1996.
 7. Sorrentino, L. and Tersigni, L., "Performance Index Optimization of Pressure Vessels Manufactured by Filament Winding Technology," *Advanced Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, pp.269-285, 2015.
 8. 정승민, 김형근, 황태경, "복합재 연소관의 금속 보스 형상 최적설계," *한국추진공학회지*, 제20권 6호, pp.29-37, 2016.