

論文

필라멘트 와인딩된 복합재 압력탱크의 설계 연구

김철웅*, 박재성*, 조인현**, 홍창선***, 김천곤****

Design of Filament Wound Composite Pressure Tanks

Cheol-Ung Kim*, Jae-Sung Park*, In-Hyun Cho**, Chang-Sun Hong***, Chun-Gon Kim****

ABSTRACT

In this study, the design method of filament wound composite pressure tanks was established by using finite element analyses. Pressure tanks were designed with and without a load sharing metallic liner. A GUI(graphic user interface) program was developed to increase the efficiency of analyses. The replacement ratio was defined in order to replace a metal pressure tank with a composite one. Finally, the best design model that is satisfied with design requirements was suggested.

초 록

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 필라멘트 와인딩된 복합재 압력탱크의 설계방법을 정립하였다. 하중을 분담하는 금속재 라이너의 유무에 따라서 각각 설계를 수행하였다. 그리고, 반복적인 설계의 효율을 높이기 위하여 상용프로그램 ABAQUS와 연계된 유한요소해석 전처리 전용 그래픽 유저 인터페이스 프로그램을 구성하여 사용하였다. 또한, 금속재 탱크를 복합재 탱크로 대체하기 위한 초기 설계 과정을 정립하고 대체율을 정의하였으며, 주어진 요구조건에 따라 설계를 수행해 봄으로써 적합한 대체율 및 설계 모델을 제안하였다.

1. 서 론

위성 발사체용 로켓의 산화제 탱크, 연료 탱크, 가압 탱크 및 자동차의 LNG 저장 탱크 등에 적용되는 압력탱크는 재료와 제작 방법에 따라서 일반적으로 Table 1과 같이 분류된다. Type 1 탱크는 금속재 탱크이고 Type 4 탱크는 복합재 탱크이다. Type 2와 Type 3는 금속재와 복합재가 모두 사용된 hybrid 탱크로써 일반적으로 금속재 라이너 위에 필라멘트 와인딩을 수행함으로써 제작된다.

Table 1 General classification of pressures tanks

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Material	Metal	Metal+Composite	Metal+Composite	Composite
Remarks		Only Hoop Winding	Helical & Hoop Winding	

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

** 한국항공우주연구원 추진기관체계그룹

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

**** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공.교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

최근까지 국내에서 제작되는 압력탱크는 Type 1의 금속재 탱크가 대부분이었지만 대형 발사체의 개발과 함께 로켓의 경량화를 위한 복합재 탱크의 개발이 요구되고 있다. 그런데, 금속재 탱크를 100% 복합재료로 대체하는 것(Type 4 탱크 개발)은 연료 및 산화제의 누출(leakage)과 보스 부분의 체결의 문제점으로 인해서, 아직 초기 개발단계인 국내의 경우에는 위험하다고 할 수 있다. 따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로써 라이너(liner)를 이용하여 금속재와 복합재가 내압을 분담하도록 설계하는 Type 2와 Type 3 탱크의 설계 방법이 제안될 수 있다.

필라멘트 와인딩 공법은 연속 섬유들을 맨드릴(mandrel) 위에 원하는 형태와 각도로 감아서 만드는 방법으로, 최근 국내에서는 자동차용 LNG 탱크 등에 적용되고 있으며 로켓의 연료탱크, 모터케이스 및 산화제 탱크에 대한 적용 연구가 활발히 진행되고 있다.

필라멘트 와인딩된 압력탱크는 크게 실린더, 돔, 접속부분(junction part) 그리고 금속재 보스 등으로 나눌 수 있는데, 이중 실린더 부분은 플러스와 마이너스의 적층각이 교대로 반복해서 쌓이는 균형적층(balanced laminate)의 형태를 나타내며 내압으로 인한 원주 방향으로의 취약성을 보강해 주기 위한 후프와인딩(hoop winding)층이 존재한다. 돔 부분은 실린더 부분에서부터 보스에 이르기까지 곡률이 연속적으로 변하는 곳으로 제작특성상 실린더에서 돔부위에 이르기까지 두께와 자오선(meridian)에 대한 섬유각도가 연속적으로 변한다. 또한, 돔 부분에서는 와인딩의 진행에 따라서 와인딩이 되어지는 표면 형상이 연속적으로 변함으로 인하여, 두께 방향으로도 와인딩 각도가 변하게 된다.

필라멘트 와인딩된 압력탱크에 대한 기존의 연구는 대부분 해석에 치우쳐져 있다. 압력탱크의 설계 연구도 돔형상 및 와인딩 패턴의 설계에 국한되고 탱크 전체의 설계 연구는 미흡한 실정이다.

먼저, Ger[1] 등은 복합재 압력탱크에 대한 설계 및 성형 방법에 대한 연구를 수행하였다. 설계 방법의 이론적 접근과 함께 와인딩 패턴, 성형의 효율성 등을 모두 고려하였고 실제 수압실험을 통해서 설계를 검증하였다. 하지만, 형상 및 와인딩 방법이 등장력 돔(isotensoid dome)형상에 국한되어 수행되었다. Azzam[2,3] 등과 Kabir[4]는 필라멘트 와인딩된 압력탱크에 대한 설계를 위하여 유한요소해석을 이용한 이론적인 방법으로 접근을 하였다. 특히, Kabir는 하중을 분담하는 라이너를 고려한 해석을 수행하였다. 하지만, 각각 특정 모델에 대한 해석만 수행됨으로써 일반적으로 적용 될 수 있는 설계 방법에 대한 연구는 미흡하였다. Carvalho[5] 등은 non-geodesic 형상에 대한 와인딩 패턴 설계 프로그램을 개발하였고, 이를 복합재 압력탱

크에 적용함으로써 임의의 돔 형상을 갖는 탱크에 대해서 효율적인 와인딩 패턴을 계산 할 수 있는 방법을 제시하였다. Sun[6] 등은 유한요소해석을 이용하여 필라멘트 와인딩된 압력탱크의 파열 압력을 예측하는 연구를 수행하였다. 선형 해석과 비선형 해석의 결과를 비교하였고, 스커트(skirt)까지 고려한 상세 모델링을 수행하였고 재료 비선형성을 고려한 파손해석도 수행하였다. 김철용[7] 등은 돔 부분에서 발생하는 두께방향의 와인딩 각도 변화를 고려한 압력탱크의 해석을 수행하였고 그 결과를 문헌의 실험 결과와 비교함으로써 잘 일치함을 보였다. 박재성[8] 등은 스커트와 돔 부분의 상세 모델링을 수행한 압력탱크 모델에 대해서 비선형 해석을 수행하였고, 수압실험을 통해서 그 결과를 검증하였다.

최근의 연구 경향을 종합해 보면, 필라멘트 와인딩된 복합재 탱크에 대해서 유한요소해석을 통한 거동 해석과 파열 압력 예측 등의 연구는 많이 진행되었지만, 금속 라이너를 고려한 체계적인 탱크설계연구가 미흡한 상태이다.

따라서, 본 연구의 목적은 필라멘트 와인딩된 복합재 압력탱크의 설계 방법을 정립하는데 있다. 이를 위해서, 맨드릴이나 라이너가 구조재료로서의 역할을 할 수 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 설계를 수행하였다. 성능에 대한 비교는 압력 탱크 전체가 금속재료로 이루어진 경우, 일부가 금속재료로 되어 있는 경우 및 일부를 복합재료로 대체할 경우에 대해 수행하였다. 또한, 금속재 탱크를 복합재 탱크로 대체하기 위한 초기 설계 과정을 정립하고, 주어진 요구조건에 따라 설계를 수행해 봄으로써, 적합한 하중 분담률 및 설계 모델을 제안하였다.

1. 복합재 압력탱크의 유한요소해석

1.1 유한요소모델

본 연구에서는 복합재 압력탱크의 설계를 위해서 유한요소해석을 이용한 이론적인 방법을 사용하였다. 그리고, 압력 탱크의 성능을 평가하는 방법으로 최초 섬유가 파손되는 내압을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 유한요소모델은 Fig. 1과 같다. 돔부분은 양방향 편중(two-way bias)방법으로 60개의 요소를, 실린더 부분은 일방향 편중(one-way bias) 방법으로 20개의 요소를 구성하였다. 사용한 요소는 20절점 3차원 적층 고체요소(3 dimensional layered solid element)이다. 경계조건은 필라멘트 와인딩된 압력탱크의 축방향 대칭성을 이용하기 위하여 반복대칭(cyclic symmetric)조건을 이용하였으며, 보

스 부분은 일반적인 형상의 금속재 보스(metal boss)가 사용된 경우의 경계 조건을 모사하기 위하여 ABAQUS의 *EQUATION 경계조건을 사용하였다.

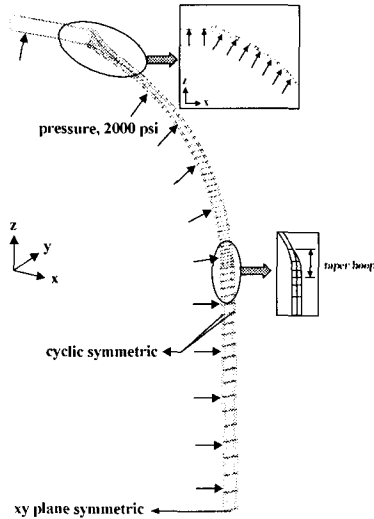


Fig. 1 Finite element model of pressure tanks.

또한, 해석에서는 재료 비선형성을 고려하였다. 필라멘트 와인딩 된 압력탱크는 내압을 받는 초기에 모재 균열(matrix cracking)이 발생하고, 이어서 섬유 파단이 발생된다. 즉, 압력탱크의 특성상 내압이 가해진 초기에는 구조물 전체에 인장이 발생되어 층간 파손/전단 파손형태보다는 수직 인장 파손이 지배적인 파손으로 나타나고, 최종적으로는 섬유 파손에 의해 구조물 파괴가 발생된다. 따라서, 재료 비선형성을 고려한 파손해석을 하기 위해서는 이러한 초기 모재 파손 이후의 거동을 예측해야한다. 본 연구에서는 재료 비선형성을 고려한 파손해석을 위하여 상용프로그램 ABAQUS의 유저 서브루틴(user subroutine)을 프로그래밍하였다. 사용한 파손이론은 최대응력파손이론(maximum stress failure theory)이며, 층별 모재 파손후의 물성 저하율(degradation factor)은 0.1로 두었다.

1.2 Graphic User Interface(GUI)

초기 설계 단계에서는 여러 변수들을 변화시켜 많은 해석을 수행하기 때문에 유한 요소 모델링과 해석에 많은 시간이 소요되지 않도록 거동을 충분히 파악할 수 있는 범위 내에서 간단한 모델을 구성해야 한다. 또한, 선택된 모델에 대한 반복적인 해석이 용이하도록 해석 전처리 프로그램을

구성함으로써 설계의 효율성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 상용프로그램 ABAQUS와 연계된 해석 전처리 전용 그래픽 유저 인터페이스, PreAft(Fig. 2)를 구성하였으며, 이를 설계에 사용하였다.

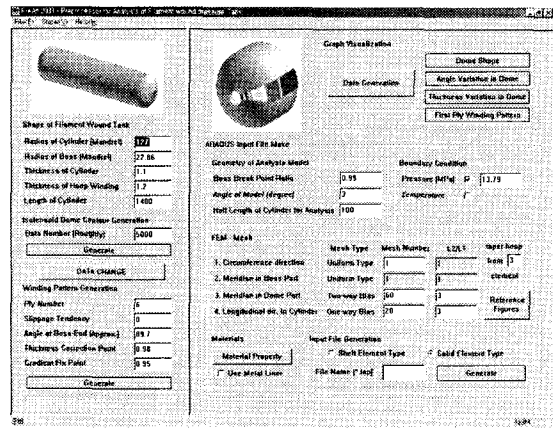


Fig. 2 Graphic User Interface - PreAft.

2. 라이너(liner)가 없는 압력 탱크의 설계

2.1 개요

라이너가 없는 압력 탱크는 맨드릴 위에 필라멘트 와인딩 공법을 통해 압력 탱크를 제작한 후 맨드릴을 제거하거나, 고분자 재료와 같이 구조적인 역할을 할 수 없는 맨드릴을 사용하는 경우로써 Type 4 탱크이다. 이렇게 제작된 탱크는 저장되어 있는 물질의 통로 역할이나 다른 구조물과의 조립에 사용되는 금속재 보스 부분을 갖게 된다. 따라서, 개구부를 따라 일정 부분이 금속재로 제작되고, 그 위에 복합재료 섬유가 와인딩되어 사용된다. Type 4 탱크는 금속 라이너를 사용하지 않기 때문에 무게 절감의 효과는 크지만, 초기 내압에서 모재 파손이 일어나기 때문에 누출의 위험이 큰 단점이 있어서 고무 라이너를 비롯한 누출 방지 설계가 필요하다. 즉, 강도가 큰 모재의 개발과 적용에 대한 선행 연구가 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 금속재 탱크가 복합재 탱크로 대체 되었을 경우의 개략적인 성능 비교를 수행하기 위해서 먼저 라이너가 없는 Type 4 탱크의 설계를 수행하였다.

본 논문에서 라이너가 없는 압력탱크의 설계를 위해서 사용한 모델은 KSR-III에 사용된 산화제 탱크(Table 2)이다

KSR-III 산화제 탱크는 금속재(알루미늄) 탱크로 제작이 되었는데, 이를 Type 4의 복합재 탱크로 대체 하였을 경우를 가정하여 설계를 수행하였다.

Table 2 Configuration of aluminum oxidizer tank

	Value
Radius of cylinder	500 mm
Radius of boss	195 mm
Thickness of cylinder	5 mm
Thickness of dome	6.5 mm
Total length	2588 mm
Length of cylinder	2188 mm
Volume	2.358 m ³

2.2 설계 방법

2.2.1 설계 개요

본 논문에서 라이너가 없는 Type 4 탱크의 설계를 위해서 제안한 방법은 Fig. 3과 같다.

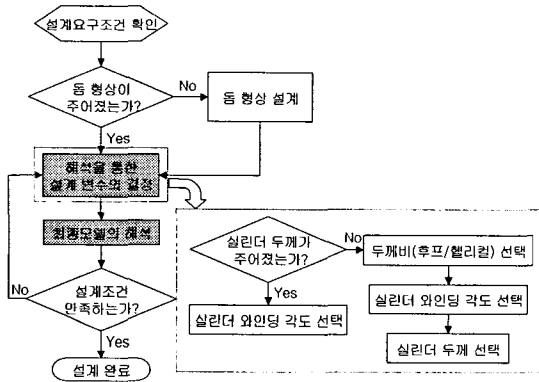


Fig. 3 Design sequence of a filament wound pressure tank without a liner.

성능 계수는 압력탱크의 성능을 판단하는 척도로서 제안되었으며 식(1)과 같다. 즉, 성능계수는 압력탱크의 무게에 비해 얼마나 큰 용량과 파손압력을 가지고 있는가를 판단하는 척도이다. 성능 계수를 적용하여 설계된 복합재 압력 탱크의 성능을 금속재 탱크와 비교하였다.

$$Performance\ Factor = \frac{PV}{W} \quad (1)$$

(단, P는 최종파손압력, V는 압력탱크의 부피, W는 압력탱크의 무게)

2.2.2 돔 형상의 설계

복합재료 압력 탱크는 돔 부분에서 곡률이 연속적으로 변하기 때문에 필라멘트 와인딩 시 미끄러짐의 문제가 발생하고, 돔 형상의 설계가 매우 제한적이다. 본 논문에서도 도입한 돔 형상은 가장 일반적인 등장력돔 형상이다. 이것은 필라멘트 와인딩시 섬유 미끄러짐이 없도록 설계된 대표적인 지오데식(geodesic) 돔 형상이다.

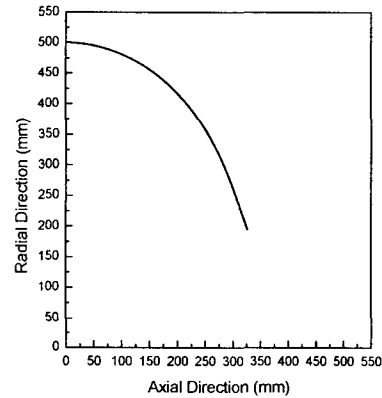


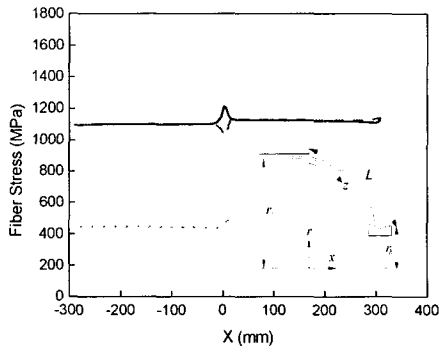
Fig. 4 Isotenoid dome shape (r_c=500 mm, r_b=195 mm).

Table 2에서 주어진 실린더와 보스 반경을 이용하여 계산한 돔 형상은 Fig. 4와 같다. 복합재 압력탱크의 경우 와인딩 시의 미끄러짐을 방지하기 위하여 금속재의 경우처럼 돔 부분을 길게 설계하는 것이 어렵다. 즉, 복합재료 탱크는 금속재료에 비해 돔부분의 용량이 작으므로 실린더 부분의 길이를 더 길게 설계해야 하는 것이 일반적이다.

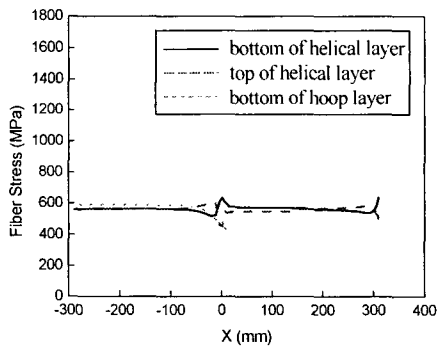
2.2.3 두께비의 선택

복합재 압력탱크는 금속재 압력탱크와 달리 실린더 부분이 헬리컬과 후프 와인딩의 두 층으로 나뉜다. 따라서, 효과적인 설계를 위해 적절한 두께비(t_{hoop}/t_{helical})를 선택하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 금속재와 같이 실린더 부분 두께를 5 mm로 고정시킨 상태에서 두께비를 각각 4.0, 1.5, 0.67, 0.25의 네 가지로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 유한요소모델은 Fig. 1과 같고, 내부

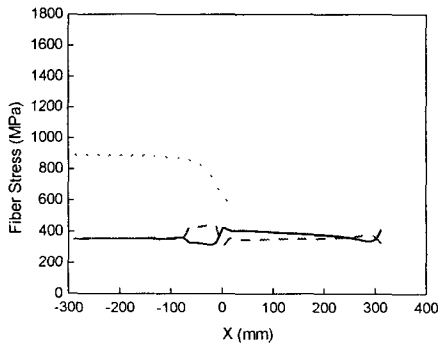
압력은 금속재 압력탱크의 파손 압력인 560 psi 로 설정하였다.



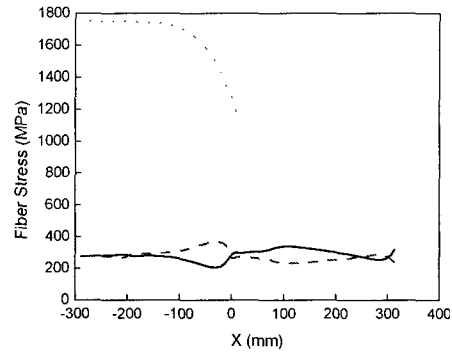
(a) $t_{hoop} / t_{helical} = 4.0$



(b) $t_{hoop} / t_{helical} = 1.5$



(c) $t_{hoop} / t_{helical} = 0.67$



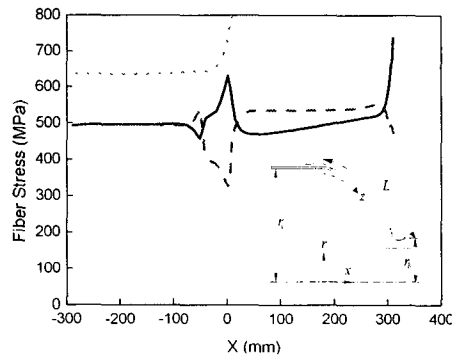
(d) $t_{hoop} / t_{helical} = 0.25$

Fig. 5 Comparison of fiber directional stress with various thickness ratios.

네 가지 경우의 두께비에 대해 각 지점의 섬유방향 응력을 계산한 결과는 Fig. 5와 같다. 가장 이상적인 설계는 길이 방향과 두께 방향 모두에서 압력탱크 전체의 응력이 고르게 분포되는 설계이므로 Fig. 5-(b)의 두께비 1.5의 경우라고 할 수 있다.

2.2.4 실린더 부분 와인딩 각도의 선택

2.2.2절의 돔 형상에 대해서 필라멘트 와인딩시 선택 가능한 실린더 부분 와인딩 각도는 $10.8^{\circ} \sim 29.1^{\circ}$ 이다.(Fig. 2의 전처리 프로그램의 시뮬레이션 결과) 따라서, 2.2.3절에서 결정된 1.5의 두께비에 대하여 전체 두께를 5 mm로 두고 와인딩 각도를 10.8° , 17.0° , 23.0° , 29.1° 의 네 가지로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 네 가지 경우에 대해서 각 지점의 섬유방향 응력을 계산한 그래프는 Fig. 6이다. 2.2.3절과 같은 기준으로 선택한 가장 이상적인 실린더 부분 와인딩 각도는 (c)의 23.0° 이다.



(a) $\alpha_c = 10.8^{\circ}$

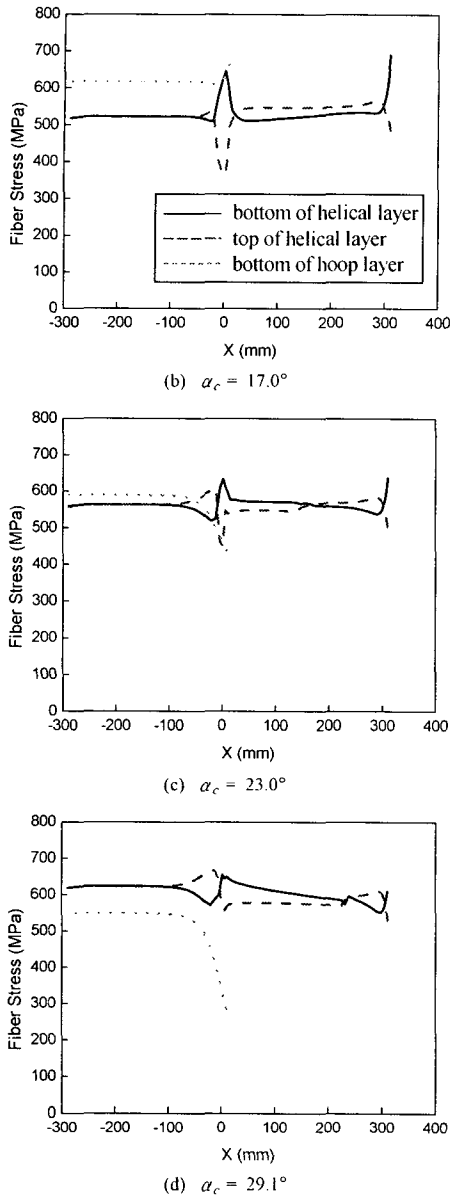
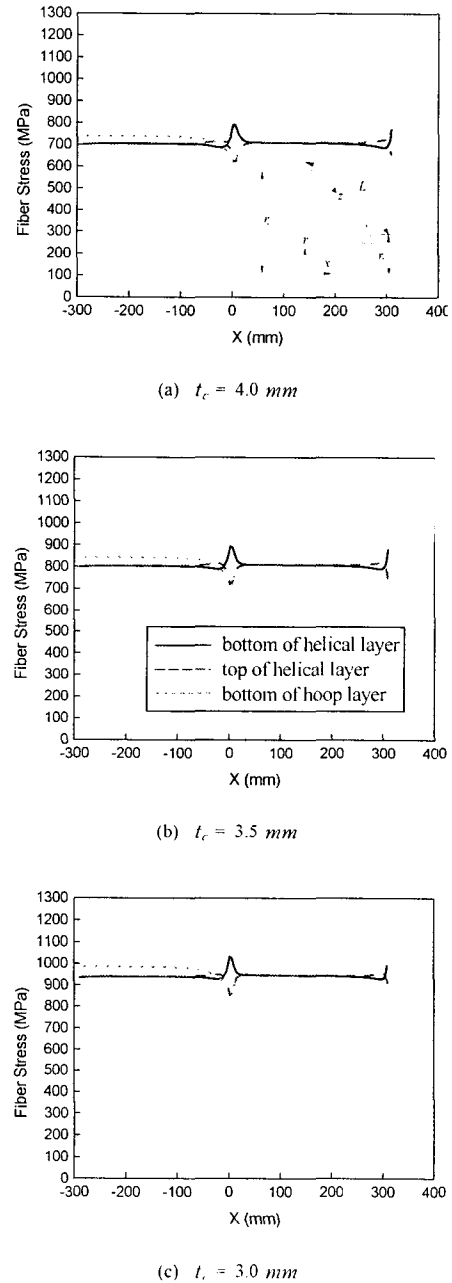


Fig. 6 Comparison of fiber directional stress with various winding angles.

2.2.5 실린더 두께의 선택

금속재료 탱크와 같은 파손 압력을 갖는 복합재료 탱크를 설계하여 두 압력탱크의 성능을 비교하기 위해서는 복합재 탱크의 실린더 두께를 설계해야 한다. Fig. 5를 보면 실린더가 5 mm이고 내부압력이 560 psi의 경우에 대해서,

최대 섬유방향 응력은 파손응력인 2300 MPa 보다 훨씬 작은 응력임을 알 수 있다. 따라서, 두 압력탱크가 같은 파손 압력을 갖기 위해서는 복합재 탱크의 경우 실린더 두께가 더 얇아질 수 있다.



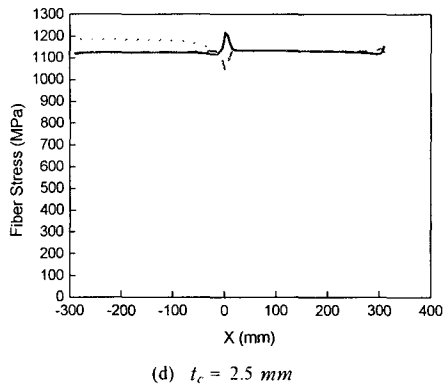


Fig. 7 Comparison of fiber directional stress with various cylinder thickness.

본 연구에서는 두께비를 1.5로 유지하면서 실린더 두께를 4.0 mm, 3.5 mm, 3.0 mm, 2.5 mm의 네 가지로 변화시켜 해석을 수행하였고, 그 결과는 Fig. 7과 같다. 그러나 가장 얇은 2.5 mm의 경우에도 섬유방향 최대응력이 1100 MPa 정도로 파손 응력인 2300 MPa에 비하여 작음을 알 수 있다. 이론적으로는 더 얇은 두께를 설정하여 설계할 수 있겠지만 실제로는 이보다 얇게 제작하는 것이 까다롭기 때문에, 본 연구에서는 최적의 최소 두께를 2.5 mm로 설정하였다. (단, 헬리컬층 두께는 1.0 mm, 후프와인딩층 두께는 1.5 mm)

2.3 설계 결과 및 분석

2.3.1 최종 설계된 모델의 해석

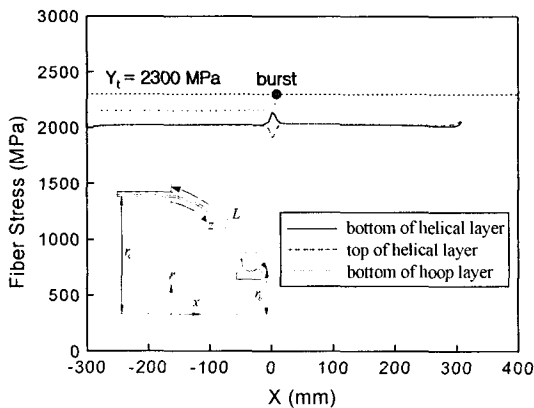


Fig. 8 Fiber directional stress for final model (p=1008 psi).

본 논문에서 설계한 복합재 압력탱크는 금속재의 경우보다 더 높은 안전계수를 갖도록 설계되었다. 따라서, 설계된 모델의 파손압력을 계산하고 전체 거동을 알아보기 위해서 최고 압력을 1120 psi로 두고 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 8로부터 설계된 복합재 압력탱크의 파손압력은 1008 psi임을 알 수 있다.(최대 오차의 절대값은 56 psi이다.) 최종 파손은 실린더와 돔의 접속 부분에서 발생하며 두께 방향의 지점은 후프 와인딩층의 바닥면임을 알 수 있다.

2.3.2 Type 1 탱크와 Type 4의 비교

금속재 압력 탱크(Type 1)와 본 연구에서 설계한 복합재 압력 탱크(Type 4)의 전체 성능을 비교하기 위하여 각 사양을 정리한 것이 Table 3과 같다. Table 3으로부터 같은 실린더 반경과 보스반경, 축방향 길이를 만족시키는 두 탱크에 대해서 복합재의 경우가 금속재에 비해 전체 용적을 제외하고는 성능이 월등히 우수함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of configuration between metallic and composite tank

	Type 1	Type 4
Radius of cylinder	500 mm	500 mm
Radius of boss	195 mm	195 mm
Thickness of cylinder	5.0 mm	2.5 mm
Thickness of dome	6.5 mm	1.0~7.5 mm
Total length	2588 mm	2588 mm
Length of cylinder	2188 mm	1936 mm
Volume	2.358 m ³	1.891 m ³
Weight	215 kgf	29.9 kgf
Burst Pressure	560 psi	1008 psi
Safety Factor	1.40	2.52
Performance Factor	0.17 × 10 ⁶ in	1.77 × 10 ⁶ in

Type 4 복합재 탱크가 성능계수 기준으로 10.4배의 높은 성능을 보임에도 불구하고 사용에 제한을 받는 이유는 제작 공정이 훨씬 복잡하고 제작비용이 많이 들기 때문이다. 특히, 복합재는 비교적 초기 압력에서 모재 파손이 일어남에 따라서 국부적인 누출 현상이 생길 수 있다. 따라서, 금속재 라이너를 적용하는 설계가 더 안전한 설계라고 할 수 있다. 하지만, 대형 액체 추진기관 로켓의 경우에는 로켓의 구조중량비를 맞추기 위하여 Type 4 탱크를 반드시 사용해야 한다. 이를 위하여, 강도가 큰 모재에 대한 연구와 단열

및 누출방지를 위한 경계층의 연구가 진행되어야 한다.

3. 라이너(liner)가 있는 압력 탱크의 설계

3.1 개요

일반적으로 필라멘트 와인딩 탱크 구조물을 제작하여 적용할 때, 저장되는 물질의 누출은 구조물의 안정성과는 별개로 중요하게 고려되는 문제이다. 이러한 누출 위험을 극복하기 위한 방법 중의 하나가 필라멘트 와인딩을 위한 틀인 맨드릴을 제거하지 않고 사용하는 방법이다. 이러한 금속재료 맨드릴을 라이너(liner)라고도 하는데, 라이너와 복합재가 내압을 분담하도록 설계함으로써 구조물의 효율을 높일 수 있다. 구조적인 하중 분담의 역할을 하는 금속 재료 라이너를 하중 분담 금속 라이너(load sharing metallic liner)라고 부르며, 일반적으로 강도와 연신률(percent elongation)이 높은 재료를 사용한다. 이와 같이 라이너를 사용한 복합재 탱크는 Table 1의 분류에 따라서 Type 2 탱크와 Type 3 탱크로 나뉘며, 2장에서 설계된 Type 4 탱크에 비해서 적용이 용이한 설계라고 할 수 있다.

Table 4 Given design parameters and materials

	Contents
Liner Material	Aluminum
Safety Factor of Liner	1.25
Material of Composite	t800/ep
Safety Factor of Composite	2.0
Radius of Cylinder	1200 mm
Radius of Boss	300 mm
Length of Cylinder	3000 mm
Operating Pressure	380 psi

본 연구에서는 금속재 탱크를 각각 Type 2 탱크와 Type 3 탱크로 대체 설계하였을 경우의 성능 비교를 수행하였다. 설계에 사용된 설계 기준은 Table 4와 같다. 일반적으로 복합재료는 구조적인 거동 및 파손 거동에 대한 편차가 금속재료보다 크므로 금속재료와 비교해서 보다 큰 안전율을 요구한다. 설계의 기준이 된 모델은 향후 국내에서 개발 계획중인 KSLV-I(Korea Space Launch Vehicle)에서 사용될 것으로 예상되는 산화제 탱크의 개략 모델이다. 이 탱크는 실린더 반경이 1200 mm로 매우 크기 때문에 중량의 문제로 인하여 금속재 탱크로 제작이 불가능한 모델이다.

3.2 설계 방법

3.2.1 Type 2 탱크의 설계

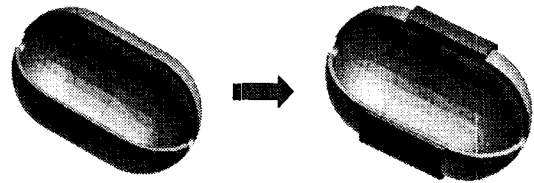


Fig. 9 Shape of a typical Type 2 tank.

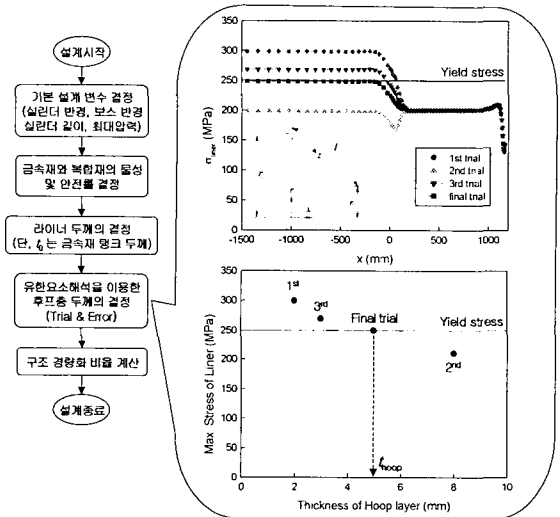


Fig. 10 Sequence of Type 2 tank design.

두께가 균일한 금속재 압력탱크는 내압에 대해서 실린더 부분이 돔 부분에 비해 원주방향으로 2배 취약하다. 따라서, 실린더 부분에 후프 와인딩을 수행함으로써(Type 2 탱크) 취약한 원주방향을 보강 할 수 있다. 또한, 복합재료의 보강을 통해서 돔에서 실린더에 이르는 전체 부분이 균일한 하중을 분담하도록 하는 구조 설계를 기대할 수 있다.(Fig. 9) 이러한 설계 방법은 탱크 전체를 복합재료로 보강하는 방법에 비해서 구조 경량화의 효과가 작은 단점이 있다. 그러나 실린더 부분만을 복합재료로 보강하기 때문에 구조 해석을 통한 설계가 용이하고 제작이 상대적으로 간단하며 금속재 탱크에서 사용된 체결의 방법을 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 이 설계는 금속재 부분의 두께를 기준으로 구조물의 50%를 복합재료로 대체하는

방법이라 할 수 있다. 본 연구에서 실린더 부분만 보강한 복합재 압력탱크를 설계하기 위해서 정립한 순서를 Fig. 10에서 정리하였다.

3.2.2 Type 3 탱크의 설계

탱크 전체가 복합재료로 보강된 압력탱크(Type 3 탱크)는 Type 2 탱크에 비해서 설계 및 구조 해석이 복잡하고 제작도 어려운 단점이 있으나 높은 경량화를 기대 할 수 있다. 이 탱크는 금속재 라이너 표면 전체 부분에 헬리컬 와인딩을 수행한 후에, 실린더 부분에 후프 와인딩을 수행함으로써 제작된다.(Fig. 11) Type 3 탱크는 라이너 전체를 복합재료가 감싸기 때문에, 금속재료의 두께를 설계조건에 맞게 설정하여 설계 할 수 있고, 라이너의 항복여부나 대체율을 변경함으로써 다양한 설계 제안이 가능하다.

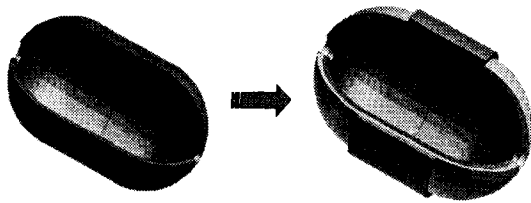


Fig. 11 Shape of a typical Type 3 tank.

Type 3 탱크는 실린더 부분만 보강한 압력탱크보다 제안되어야 할 설계변수가 다양하다. 먼저, 효율적인 돔 부분의 형상을 결정해야 하는데 일반적으로 헬리컬 와인딩을 위해서는 등장력돔을 많이 사용한다. 그러나, 등장력돔은 형상의 특이성으로 인하여 제작이 상대적으로 어려워 제작이 용이하고 설계가 단순한 반구형돔도 많이 사용한다. 돔의 형상에 따라서 설계 결과에 큰 차이가 나므로, 두 가지 경우를 나누어서 설계를 수행해야 하며, 최종적으로 어느 형상이 더 적합한지를 결정해야 한다.

다음으로 제안되어야 할 변수는 적절한 대체율이다. 본 연구에서는 제안한 대체율 정의는 식(2)와 같다. Type 3 탱크는 탱크 전체를 감싸는 보강이기 때문에 금속재료의 두께를 줄여 대체율을 높일 수 있으며, 가장 적합한 대체율이 설계를 통해서 제안되어야 한다.

$$replcement\ ratio = \frac{t_{metal\ tank} - t_{liner}}{t_{metal\ tank}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

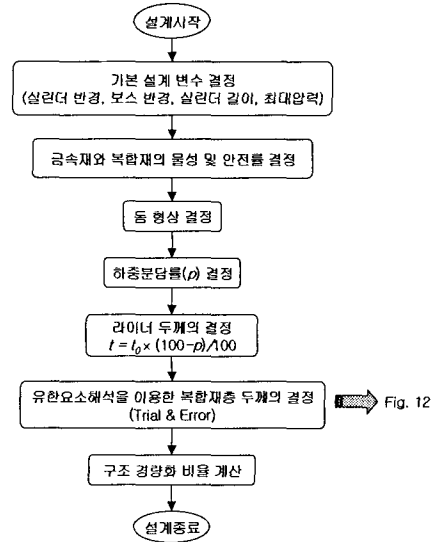


Fig. 11 Sequence of Type 3 tank design.

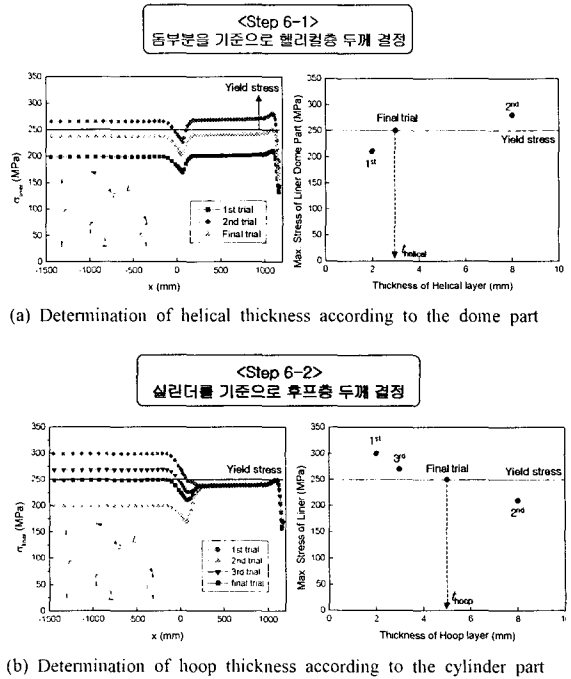


Fig. 12 Sub-sequences to determination layer thickness on Step 6.

마지막으로 실린더 부분의 복합재료층 전체 두께를 결정해야 한다. 헬리컬층과 후프층의 두께는 압력탱크의 거

동을 좌우하는 중요한 설계 변수이므로 신중하게 결정해야 한다. 본 연구에서 Type 3 탱크를 설계하기 위해서 정립한 순서를 Fig. 11~Fig. 12에서 순서도로 표현하였다.

3.2.3 라이너 항복을 허용한 Type 3 탱크의 설계

Type 3 탱크의 경우에는 금속재료 라이너가 항복 지점을 넘어선 이후에 복합재료만으로 내압을 담당할 수 있도록 설계가 가능하다. 이를 위해서는 금속재료의 파손이 일어나지 않도록 라이너의 재료를 연신률이 높은 것으로 선택해야 한다. 그리고, 해석에서도 소성 영역의 변형을 고려하기 위한 elasto-plastic 해석을 수행해야 한다. 이러한 라이너의 항복 허용 설계를 통해서 매우 높은 경량화를 기대할 수 있겠지만, 위험성이 높은 설계 방법이며, 실제 제품의 제작과 실험을 통한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 라이너의 항복을 허용한 설계를 위해서 알루미늄의 강성이 항복후에 일정하게 유지된다는 가정을 사용하였다.

3.3 설계 결과 및 분석

3.3.1 Type 2 탱크 설계결과

실린더 부분만 보강한 압력탱크의 설계를 3.2절에서 소개한 과정을 통해 수행하였고 결과를 Table 5에서 정리하였다. 금속탱크를 기준으로 7.9 mm의 두께를 대체하기 위해서 복합재가 5.5 mm 필요하였다. 또, 무게가 4993.82 kgf에서 2677.15 kgf로 46.4% 감소함을 알 수 있다.

Table 5 Design result of Type 2 tank

	Type 1	Type 2
Liner	15.7 mm	7.9 mm
Hoop	-	5.5 mm
Weight	4993 kgf	2677 kgf

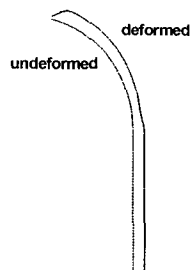


Fig. 13 Deformation shape of Type 2 tank

설계된 Type 2 탱크의 최대 작동압력인 380 psi에서의

변형 개요는 Fig. 13과 같다. 실린더와 돔 부분에서 전체적으로 균일하게 부푸는 변형을 확인 할 수 있고, 보스의 끝 부분과 접속 부분에서 국부적인 응력 불연속의 탈생을 예측할 수 있다. Fig. 14는 최대 작동압력일 때 설계된 압력 탱크의 응력을 나타내었다. 라이너의 응력은 von-Mises 응력이며, 복합재 후프 와인딩층의 응력은 섬유 방향 응력이다. 라이너의 실린더 부분이 돔 부분에 비해서 전체적으로 균일하게 높은 응력을 받고 있음을 알 수 있다. 그리고, 라이너가 항복응력에 거의 도달한 반면에, 복합재료는 섬유 파손 응력인 2300 MPa에 크게 못 미침을 알 수 있다.

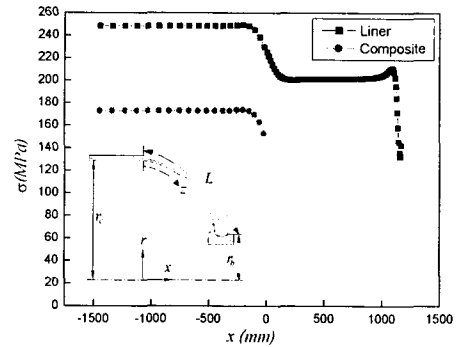


Fig. 14 Stress distribution of Type 2 tank under maximum operating pressure.

3.3.2 Type 3 탱크 설계결과

탱크 전체를 보강한 Type 3 탱크에 대해서 라이너 항복을 허용하지 않는 설계를 수행하였고, 대체율을 60, 70, 80%로 변화시키면서 수행한 설계 결과를 Table 6에서 정리하였다. Table 6으로부터 대체율이 높을수록 탱크무게가 감소하지만 그 차이는 그리 크지 않음을 확인 할 수 있다. 이는 줄어드는 금속재 탱크의 두께를 보상하기 위해 비교적 많은 복합재 층의 두께가 필요하다는 것을 의미한다. 또한, 70% 이상의 대체율을 가진 탱크는 헬리컬층의 두께가 상당히 두꺼워지므로, 와인딩 중에 보스 부분의 두께로 인한 문제를 발생시킬 수도 있음을 예측할 수 있다. 따라서, 항복을 허용하지 않는 Type 3 탱크의 설계에서는 60%의 대체율을 가진 탱크가 가장 적합하다고 할 수 있다.

Table 6 Design result of Type 3 tank

Replacement Ratio	60%(Type 3)	70%(Type 3)	80%(Type 3)
Liner	6.3 mm	4.7 mm	3.1 mm
Helical	4.3 mm	8.2 mm	13.7 mm
Hoop	7.7 mm	9.8 mm	12.0 mm
Weight	2363 kgf	2247 kgf	2238 kgf

3.3.3 돔 형상에 따른 설계결과 비교

돔 부분의 형상이 바뀔에 따라서 복합재 탱크 전체의 거동이 크게 변하므로 실제 복합재 탱크의 제작에서 돔 부분에 어떤 형상을 사용하는 것이 좋은가를 미리 해석을 통해 예측해 보는 과정이 필요하다. 일반적으로 탱크의 돔 형상으로는 등장력돔 형상과 반구형돔 형상이 사용된다. 등장력돔 형상은 필라멘트 와인딩의 geodesic path를 위한 돔 형상으로써 Fig. 15에서 확인 할 수 있듯이, 반구형 돔에 비해서 길이 방향이 짧은 형상이다. 따라서, 등장력 돔을 사용한다면 주어진 탱크 길이에 대해 보다 넓은 내부 부피를 활용할 수 있다는 장점이 있다.

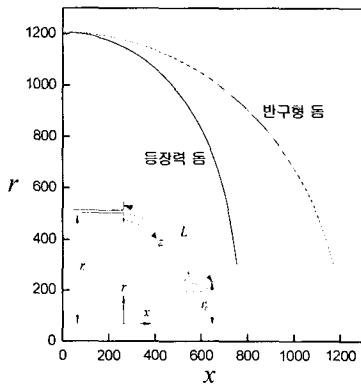


Fig. 15 Comparison of dome shape between hemisphere and isotoensoid dome.

Table 7은 각각의 돔형상에 대해서 대체율을 60%로 설정하고 설계를 수행한 결과를 비교한 표이다. 표로부터 각 형상에 따라 설계 경향이 매우 다름을 확인 할 수 있다. 등장력돔은 헬리컬층이 4.3 mm, 후프층이 7.7 mm가 필요한 반면, 반구형돔은 헬리컬층이 1.0 mm, 후프층이 9.0 mm가 필요하므로, 와인딩 층의 두께 비율이 크게 다르다. 반구형돔의 경우에 헬리컬층의 두께가 적게 필요하다는 것은 돔 부분이 금속재 만으로도 비교적 안정하다는 것을 의미한다. 이를 확인하기 위하여 각각의 형상에 대해 최대 작동압력에서의 변형 개요를 Fig. 16에서 비교하였다. 그 결과, 반구형돔 탱크의 실린더 부분과 돔 부분이 고른 변형을 보이는 것에 반해, 등장력돔 탱크는 보스 부분의 길이 방향 변형이 커서 돔 부분이 전체적으로 반경방향 변형에 제약을 받음을 확인 할 수 있었다. 따라서, 반구형돔보다 등장력돔이 돔 부분의 보강을 위한 헬리컬층의 두께가 더 많이 필요하다는 Table 7의 견과를 검증 할 수 있었다.

또한, 최대 작동압력에서의 표면 응력을 Fig. 17에서 비

Table 7 Design result of various dome shapes

Replacement Ratio	60%(Type 3)	
	Isotoensoid	hemisphere
Liner	6.3 mm	6.3 mm
Helical	4.3 mm	1.0 mm
Hoop	7.7 mm	9.0 mm
Weight	2363 kgf	2376 kgf

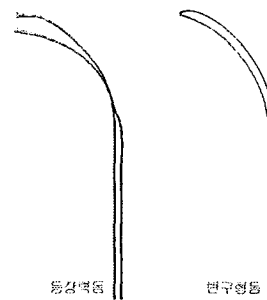


Fig. 16 Deformation shape for various dome shape.

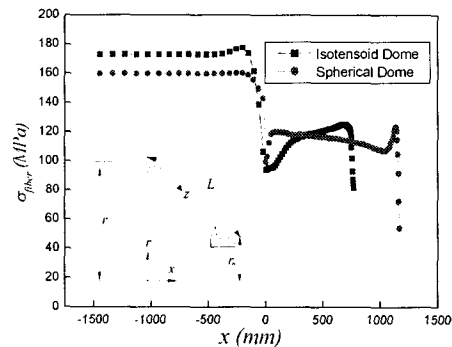


Fig. 17 Fiber directional stress for various dome shapes.

교해 보았다. 그 결과, 반구형돔 탱크가 등장력 돔 탱크에 비해서 상대적으로 낮은 응력 상태를 확인할 수 있다.

따라서, 위의 모든 결과를 비교해 볼 때, 등장력돔과 반구형돔은 각각의 장, 단점을 갖고 있다. 반면에, 두 탱크의 무게 차이는 크지 않으므로, 설계 요구조건에 따라서 적합한 돔 형상을 선택해야 함을 알 수 있다.

3.3.4 라이너의 항복 여부에 따른 설계 결과 비교

Table 8은 80%의 대체율을 갖는 등장력돔 형상의 탱크에 대해 라이너의 항복을 허용한 경우와 허용하지 않은 경우의 설계 결과를 비교한 표이다. 결과로부터 항복을 허용

하면 허용하지 않은 경우에 비해 큰 무게 절감 효과가 있음을 확인 할 수 있다.

Table 8 Design result according to the yielding of a metal liner

Replacement Ratio	80%(Isotensoid dome)	
	Don't Permit Yield	Permit Yield
Liner	3.1 mm	3.1 mm
Helical	13.7 mm	1.0 mm
Hoop	12.0 mm	1.0 mm
Weight	2238 kgf	1001 kgf

결 론

본 연구에서 수행한 필라멘트 와인딩된 압력탱크의 설계 결과를 종합하여 Table 9에 정리하였다. 두께가 15.7 mm인 Type 1의 금속재 탱크는 Type 2, Type 3의 두가지로 대체 설계가 가능하며, Type 3의 경우에는 라이너의 항복 허용 여부에 따라서 두가지의 설계가 가능하다. 전체적으

Table 9 Final design result of hybrid tanks

	Metal Tank (Type 1)	Composite Tank		
		Type 2	Type 3-1	Type 3-2
Replacement Ratio	-	50 %	60 %	80 %
Dome Shape	hemisphere	hemisphere	Isotensoid	Isotensoid
Yield	Not Permit	Not Permit	Not Permit	Permit
Liner	15.7 mm	7.9 mm	6.3 mm	3.1 mm
Helical	-	-	4.3 mm	1.0 mm
Hoop	-	5.5 mm	7.7 mm	1.0 mm
Weight	4993 kgf	2677 kgf	2363 kgf	1001 kgf

로 금속재 탱크를 복합재 탱크로 대체 설계함으로써 큰 무게절감효과를 기대 할 수 있다. 그리고, Type 3는 라이너의 항복을 허용하지 않는 경우 대체율을 60%로 설계하는 것이 적합하며, 라이너의 항복을 허용하는 경우에는 80%로 설계하여도 무게절감 효과가 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나, 라이너의 항복을 허용하는 경우에는 반드시 설계 위험을 줄이기 위한 실험적인 접근이 필요하다. 특히, 금속재료 라이너 제작시 발생하는 용접(welding) 접합부는 변형률에 민감하므로, 라이너 항복을 허용하는 설계는 접합 방법 및 접합부 해석에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구를

통해 가장 현실적이고 안전한 복합재료 탱크는 60%의 대체율을 갖는 Type 3-1의 설계 결과라고 제안 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원(KARI)이 지원하는 3단계 과학로켓(KSR-III) 개발 사업의 위탁과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) G. S. Ger, D. G. Hwang, W. Y. Chen and S. E. Hsu, "Design and Fabrication of High Performance Composite Pressure Vessels," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol 10, 1998, pp. 157-163.
- 2) B. S. Azzam, M. A. A. Muhammad, M. O. A. Mokhtar and F. A. Kolkailah, "A Finite Element Presentation of an Optimum Design for the Filament-Wound Composite Pressure Vessels," *40th International SAMPE Symposium*, May 8-11, 1995.
- 3) B. S. Azzam, M. A. A. Muhammad, M. O. A. Mokhtar and F. A. Kolkailah, "A Theoretical and Design Analysis of the Filament-Wound Composite Pressure Vessels," *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol. 4, No. 2, 1995, pp 73-87
- 4) M. Z. Kabir, "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner," *Composite Structures*, Vol. 49, 2000, pp. 247-255.
- 5) J. D. Carvalho, M. Lossie, D. Vandepitte and H. V. Brussel, "Optimization of Filament-Wound Parts Based on Non-geodesic Winding," *Composite Manufacturing*, Vol. 6, 1995, pp. 79-84.
- 6) X. K. Sun, S. Y. Du and G. D. Wang, "Bursting Problem of Filament Wound Composite Pressure Vessels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 76, 1999, pp. 55-59.
- 7) 김철웅, 박재성, 홍창선, 김천곤, "두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려한 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석," *한국복합재료학회지*, 제13권, 제2호, 2000, pp. 51-60.
- 8) 박재성, 강현규, 김철웅, 황태경, 홍창선, 김천곤, "필라멘트 와인딩된 복합재 탱크의 거동해석과 변형률 측정, 1. 필라멘트 와인딩 탱크의 유한요소해석," *한국항공우주학회지*, 제29권, 제7호, 2001, pp. 49-55.