

필라멘트 와인딩 공법을 적용한 복합재 압력용기의 설계 및 제작 연구

이하승¹ · 박현범^{1,†}¹군산대학교 기계공학부

A Study of the Design and Manufacturing of a Composite Pressure Vessel Applied to the Filament Winding Manufacturing Method

Haseung Lee¹, Hyunbum Park^{1,†}¹School of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

In this study, the design and analysis of a pressure vessel using composite material was performed. The structural safety and stability were evaluated by FEM analysis. The material applied to the structural design is a carbon-epoxy composite material. The angle and thickness of laminate were defined by the structural design. The vessel was designed considering the axial and circumferential directions. The composite pressure vessel was manufactured using the filament winding manufacturing method. The validity of the final design result was verified.

초 록

본 연구에서 복합재료를 적용한 압력용기의 설계 및 해석에 관한 연구를 수행하였다. 구조 안전성 및 안정성은 유한 요소 해석 기법을 활용하여 평가되었다. 구조 설계에 적용된 재료는 카본-에폭시 복합재료이다. 구조 설계를 통해 적층 각도와 적층 두께를 결정하였다. 압력용기의 축방향과 원주방향을 고려하여 설계하였다. 복합재 압력용기는 필라멘트 와인딩 제작 공법으로 제작되었다. 최종 설계 결과의 타당성을 검증하였다.

Key Words : Pressure Vessel(압력 용기), Structural Design(구조 설계), Structural Analysis(구조 해석), Composite Structure(복합재 구조)

1. 서 론

항공우주 분야에서 금속재를 대체하여 복합재료 사용이 증가하고 있다. 또한 경량화가 필요한 기계 구조물은 대부분 복합재료가 적용된다. 유체를 저장하는 압력용기도 기존에는 금속재 압력용기였다. 그러나 최근에 복합재 압력용기가 내압 성능이 우수한 것으로 확인되었다. 따라서 대부분 복합재 압력용기에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다.

최근 압력용기는 대부분 복합재료로 대체되고 있다. 압력용기는 내부에 가압된 액체의 저장을 담당하는 구조물이다. 기계 제조 분야 산업이 발전하면서 가압이 되어있는 액체나 가스의 사용이 증대되고 있다. 따라서 이러한 유체를 저장하는 압력용기 개발이 활발하게 추진되고 있다. 특히 복합재료는 필라멘트 와인딩 공법이 발달하면서 최근 대부분의 압력용기는 복합재 구조물로 제작되고 있다. 필라멘트 와인딩 성형 기법은 수지가 함침된 연속 섬유를 회전하는 심축 위에 감아서 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 공법이다. 필라멘트 와인딩 성형은 심축의 회전속도와 섬유의 공급 위치를 이동시키는 캐리지(carriage)의 속도를 조절하

Received: Feb. 08, 2023 Revised: Mar. 13, 2023 Accepted: Mar. 14, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-63-469-4729, E-mail: swordship@kunsan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

여 제작한다[1]. 본 연구에서 수소 압력용기를 새롭게 설계하여 제작공법 연구를 수행하였다.

일반적으로 고압수소가스 저장 용기는 탄소강 및 합금 등으로 제작되는 Type 1, 가스 기밀성과 누출 방지를 위하여 두꺼운 라이너를 위에 강화 섬유 등을 적층하여 라이너와 강화섬유가 비슷한 비율로 하중을 담당하는 Type 2, 금속 라이너위에 복합재료를 적층하여 하중의 80%를 복합재료가 담당하여 Type 1 압력용기에 비해 50%이상 경량화가 가능한 Type 3, 금속 라이너 대신에 고분자폴리머 계열을 라이너를 이용하여 기존 Type 3에 비해 더 높은 경량화가 가능한 Type 4, 라이너가 존재하지 않으며 복합재료만으로 제작된 Type 5로 나누어 진다[2, 3].

합금 및 탄소강 등은 수소와 접촉 시 수소 흡착 및 해리로 인해 취성이 발생한 수소 취화(hydrogen embrittlement: HE)를 야기시킨다. 수소 취화h 인해 재료의 강도, 강성 및 피로 강도 등이 저하되는 단점이 있으며, 이에 수소 압력 용기는 알루미늄 및 구리 합금 등을 적용하거나 Type4로 제작 되는 복합재료 압력용기의 연구가 수행되었다[3,4]. Luigi Solazzi 등은 복합재 적용 압력용기 설계에 관한 연구를 수행하였다[5]. B. Ellul 등은 필라멘트 와인딩 제작 공법의 장점에 대한 연구를 수행하였다[6]. 김남훈 등은 탄소 섬유를 적용한 6.8L급 복합재 압력용기의 구조 해석을 통해 안전성을 평가하였다[7]. 정승민 등은 복합재 압력용기의 성능지수 최대화를 위한 적층 설계변수 연구를 수행하였다[8].

본 연구에서는 수소 취화에 대비한 압력용기에 카본/에폭시 복합재료를 적용하여 구조 설계를 수행하였다. 구조 설계 결과는 유한 요소 해석 기법으로 구조 안전성을 평가하였다. 최종 필라멘트 와인딩 제작 공법으로 대상 압력용기의 제작 가능성을 검토하여 제시하였다.

2. 구조 설계 및 해석

복합재 압력용기 설계를 위해서는 제작 공법인 필라멘트 와인딩 공법으로 제작할 수 있는 가능성을 확인하여 설계를 진행해야 한다. 필라멘트 와인딩의 구조 재료는 거시적으로 대칭각으로 적층된 적층판 구조 형

태와 같다. 그런데 압력용기는 주 하중이 내압을 받기 때문에 망상 구조 형태의 응력 해석 기법으로 설계를 접근해야 한다. 망상 구조 하중 해석 개념 형상을 Fig. 1에 제시하였다.

망상 구조 이론에 의해 평면상의 수직한 두 응력은 한 방향의 힘으로 합하여질 수 있다. 따라서 원주방향과 축방향의 두 수직한 힘의 합력이 필라멘트 방향이 되도록 와인딩 각도를 결정할 수 있다. Fig. 1은 망상 구조의 하중 분석 개념도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 원주방향 하중 F_h 와 축방향 하중 F_l 이 F 와 관계를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 원주방향 응력 S_h 는 아래와 같다.

$$F_h = 2F \sin \alpha \tag{1}$$

$$S_h = \frac{2F}{Xt} \sin \alpha = S_f \sin^2 \alpha \tag{2}$$

$$S_f = \frac{2F}{Wt}, W - X \sin \alpha \tag{3}$$

여기서, 축방향 응력 S_l 는 아래와 같다.

$$S_l = \frac{F_l}{Yt} = \frac{2F}{Yt} \cos \alpha = S_f \cos^2 \alpha \tag{4}$$

$$W = Y \cos \alpha, S_f = \frac{2F}{Wt} \tag{5}$$

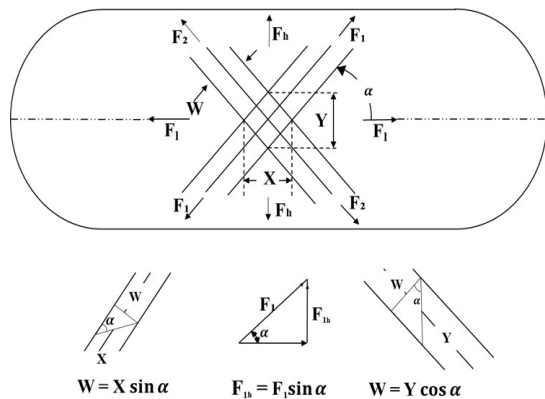


Fig. 1 Load Analysis of Netting Structure

이와 같이 내압을 받는 실린더의 와인딩 각도에 따른 응력을 도출 할 수 있으며 이를 통해 최적의 와인딩 각도를 결정 할 수가 있다. 길이가 무한대인 밀폐된

실린더 형태에서 원주방향 응력은 역학적으로 축방향 응력의 2배가 되므로 이론적으로는 필라멘트 와인딩 각도를 54.75°로 설계할 경우 원주방향과 축방향 응력의 합력을 섬유가 모두 받게 된다.

실제 고압가스 유체 수송관 등은 54.75° 각도로 제작하면 재료의 방향 특성을 가장 잘 적용한 결과이지만 이론적 결과이고, 압력 용기는 끝단 부분이 돔 형태로 제작이 되어 무한한 형상은 아니므로 돔 부분의 설계가 관건이 된다. 따라서 이 부분을 고려하여 설계를 수행하였다.

본 연구 대상 압력용기는 Type 4 형태로서 금속 Boss와 고분자 HDPE(High Density Polyethylene) 형태가 결합된 형상 위에 UD 카본 섬유를 필라멘트 와인딩 공법을 통해 제작하는 형상이다. 돔의 두께는 돔의 곡선이 시작하는 Knuckle 부분의 두께가 12.8mm 노즐 목 부분이 133.5mm로서 UD의 두께를 고려 시 Knuckle 영역은 16Ply 에서 노즐 목두께 100Ply로 비선형적으로 증가한다. 이러한 적층 방안을 구현하기 위하여 돔 영역을 2Ply 단위로 두께 변화를 고려하여 29개 영역으로 분할하여 설계하였다. Fig. 2 는 Liner와 Boss의 형상을 보여주고 있다. 대상 구조물은 2Ply 기준으로 중간 영역을 포함하여 좌우 29개 씩 총 59개의 두께가 다른 적층 영역을 가지며, 중간 영역은 Hoop(90°)와 Helical(±12.5°)로 적층되며 돔 부분은 전부 Helical로 적층 된다. Fig. 3은 구조 해석을 수행하기 위해 적층된 구조 형상을 보여주고 있다. Fig. 3은 중간 영역의 적층 형상을 보여주고 있다. Fig. 4는 돔의 곡선이 시작하는 Knuckle 부분의 적층 형상을 보여주고 있다. Fig. 5에 Helical 방향으로 ±12.5°로 적층된 형상을 제시하였다.

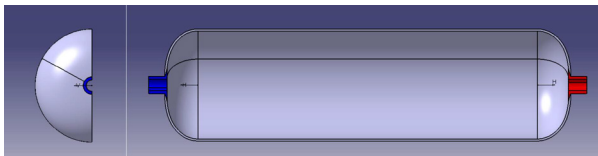


Fig. 2 Configuration of Liner and Boss Geometry

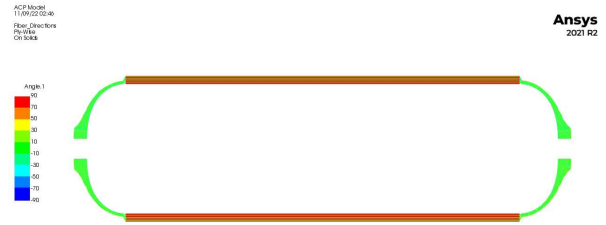


Fig. 3 Lamination of Middle Body

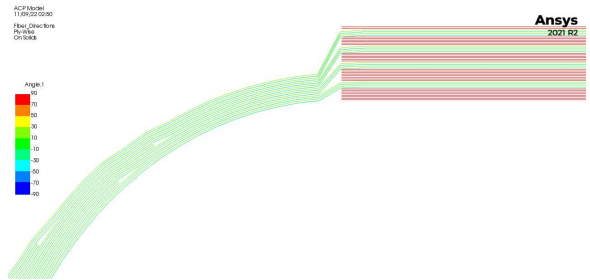


Fig. 4 Lamination of Knuckle Area

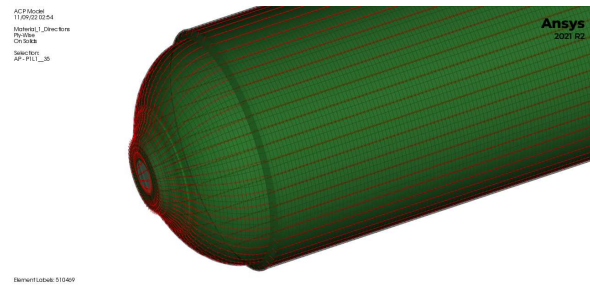


Fig. 5 Laminated Fiber Angle(-12.5°) of Helical Direction

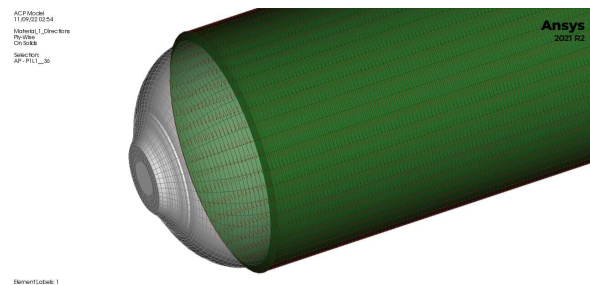


Fig. 6 Laminated Fiber Angle(90°) of Hoop Direction

구조 해석을 위한 ANSYS 적층 구현 프로그램인 ACP를 통해 형성된 복합재료 적층 모델과 Liner 및 Boss 모델을 결합하여 구조 해석을 수행하였다. 총 노드는 907,707개이며, 총 요소는 755,337개 이다. 경계 조건은 한쪽 Boss 입구 부분을 완전 구속하였으며, 반대쪽 Boss 부위는 Y, Z만 구속하였다. Fig. 7에 유한 요소 해석을 위한 모델링 생성 결과를 제시하였다. Fig. 8은 경계조건을 보여주고 있다. 적용 하중은 작용 압력 450bar, 최대 허용 작용 압력(Maximum Expected Operation Pressure)은 운용 압력의 1.5배를 적용하여 675bar를 적용하였으며, 파괴 압력 예측을 위해 파괴 압력은 1,300bar, 1,350bar, 1,400bar, 1,451bar 압력에 대해 구조 해석을 수행하였다. 또한 100bar에서 1,300bar 까지 100bar 씩 단계적으로 압력을 증가시켜 최대 응력 및 최대 변형률을 검토하였다.

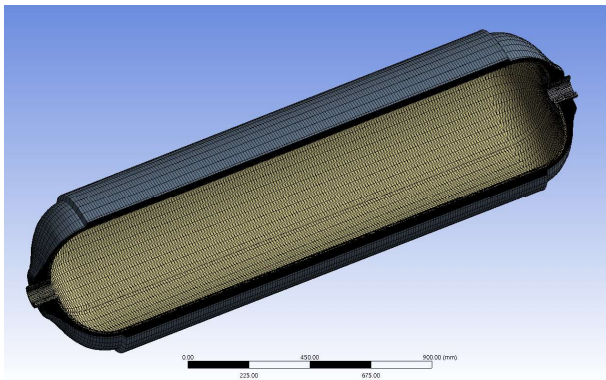


Fig. 7 Finite Element Modeling

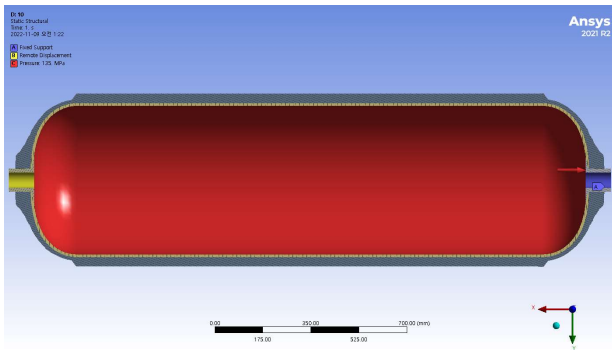


Fig. 8 Boundary Condition

구조 설계 및 해석을 위하여 적용된 복합재료는 카본/에폭시 복합재료이다. 그리고 Liner의 경우 고분자 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene)이 적용 되었으며, Boss의 경우 Aluminum 6061-T6를 적용 하였다.

구조 해석 결과를 주로 확인한 Ply는 각 적층 각도 섬유 중 최대 내각 지점으로 선정하였으며, 이는 각 Ply별 응력 확인 시 내각에 가까울수록 높은 응력 값을 보이기 때문이다. 이때의 주요 응력을 측정하는 섬유 층은 Hoop 방향은 Layer 1, Helical 방향은 Layer 9 이다, 해석 결과 확인 시 Hoop 방향 섬유 보다는 Helical 방향의 섬유가 더욱 높은 응력 값을 보이며, 이는 Knuckle 부분의 응력 집중으로 판단되었다. 이러한 경향은 기타 유사한 복합 재료 압력용기와 비슷한 경향을 가지는 것으로 분석되었다.

작용 압력 450bar에서 Hoop 방향 섬유의 응력은 752.7MPa 이며, Helical 방향은 1097.6MPa로 섬유의 최대 인장 강도인 2950MPa 미만으로 안전한 것을 확인하였다. 최대 허용 작용 압력 675bar에서는 Hoop 방향 섬유의 응력은 979.06MPa, Helical 방향은 1158.3MPa로 검토되었다. 파괴 압력에서는 2902.1MPa로 재료의 최대 인장 강도인 2950MPa 보다는 낮으나 매우 근접 한 것을 확인 할 수 있었다.

파손이 시작되는 하중 예측 및 하중에 따른 경향 분석을 위해 100bar에서 1300bar 까지 100bar의 단계적 압력 증가를 통해 Hoop 방향 Layer 1, Helical 방향 Layer 9에서의 압력별 최대 하중 및 변위 확인 시 1300bar에서 Helical방향 섬유의 파손 시작이 예측 되었다. 또한 해석 결과 라이너 역시 최대 허용 작용 압력 전에 재료의 항복 응력이상의 하중을 받으나 파괴 압력에서도 파단 연실률인 1000%에 접근 하지 못하는 10% 수준으로 항복응력은 넘어가나 파단은 발생 하지 않는 것을 확인 하였다. 이후 자세한 파손 경향 판단을 위해 1,400, 1,451Bar 해석을 진행 하였다.

특정 지점에서 Ply별 응력을 확인하기 위하여 구조 해석을 수행 하였다. 응력을 측정하는 Point는 압력용기의 가장 가운데 지점과 Knuckle 부분으로 정하였다. 가운데 지점에서는 총 46Ply 이며 Kunckle 부분은 Helical 방향의 적층만 존재하며 총 16Ply이다. 구조

해석 결과 가운데 지점에서는 Layer 1에서 섬유방향 최대 응력이 작용하며, Layer 12가 가장 낮은 것을 확인 할 수 있었다. Knuckle 부분에서는 Layer 1에 섬유방향 최대 응력이 작용하며, Layer 14가 가장 낮은 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 9는 Hoop 방향 응력 해석 결과이다. Fig. 10은 Helical 방향 응력 해석 결과이다. Fig. 11은 Hoop 방향 변형률 해석 결과이다. Fig. 12는 Helical 방향 변형률 해석 결과이다.

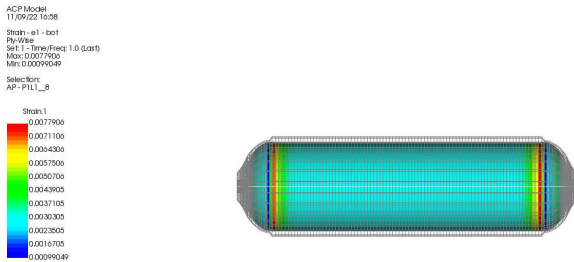


Fig. 9 Stress analysis result of Hoop Direction : Working pressure

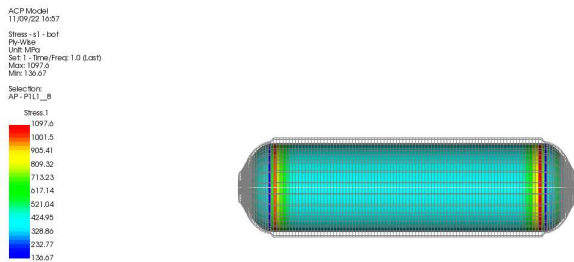


Fig. 10 Stress analysis result of Helical Direction : Working pressure

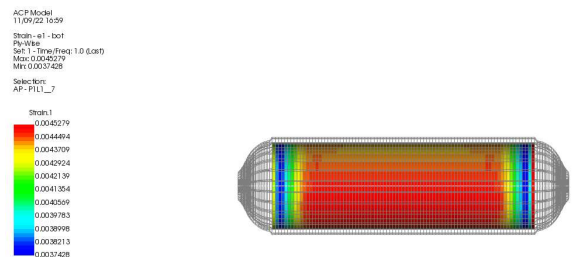


Fig. 11 Strain analysis result of Hoop Direction : Working pressure

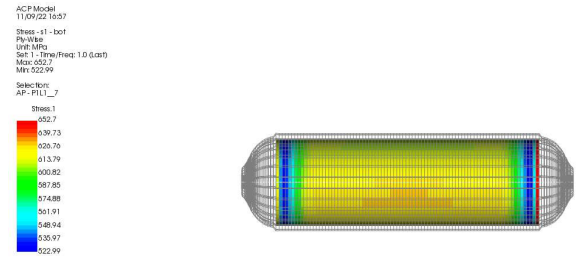


Fig. 12 Strain analysis result of Helical Direction : Working pressure

3. 결 론

본 연구에서 복합재가 적용된 압력용기의 구조 설계 및 해석 연구를 수행하였다. 본 구조 해석 대상인 압력용기는 Type 4형태로 금속 Boss와 고분자 고밀도 폴리에틸렌이 결합된 형상위에 카본 일방향 섬유가 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 구조물이다. 구조 설계를 통해 도출된 구조 형상을 모델링하여 구조 해석을 수행하였다. 구조 해석은 상용 유한 요소 해석 코드를 활용하여 구조 해석을 수행하였다. 구조 해석 결과 Hoop 방향 섬유 보다는 Helical 방향의 섬유가 더욱 높은 응력 값을 보이며, 이는 Knuckle 부분의 응력 집중으로 판단되었다. 이러한 경향은 기타 유사한 복합 재료 압력용기와 비슷한 경향을 가지는 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해 구조 설계된 압력용기의 구조 해석 결과를 검토한 결과 타당하게 설계된 것으로 확인되었다. 따라서 필라멘트 와인딩 공법으로 제작 가능성을 판단할 때 충분히 제작 가능한 것으로 검토되었다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2018R1D1A1B07043553)을 받아 수행된 연구임(P0012769, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

References

- [1] Y. J. Jeoun, W. I. Lee, K. J. Yoon, T. W. Kim, Latest Composite, Seoul, Kyohak Co., Ltd, 1995.
- [2] T. Michler, M. Lindner, U. Eberle, J. Meusinger, 3 - Assessing hydrogen embrittlement in automotive hydrogen tanks, In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, Woodhead Publishing, vol. 2, pp 94-125, 2012.
- [3] J. Garche, T. Smolinka, M. A. Navarra, S. Panero, B. Scrosati, Chapter 11 - Regenerative fuel cells, *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*, Elsevier, pp 365-406, 2022.
- [4] J. C. Choi, S. Y. Jung, S. Kim, "Development of an automated design system of a CNG composite vessel using a steel liner manufactured using the DDI process," *International Journal of Advanced Manufacturing Engineering*, vol. 24, pp. 781-788, 2004.
- [5] L. Solazzi, M. Vaccari, "Reliability design of a pressure vessel made of composite materials," *Composite Structures*, vol. 279, pp. 12, 2022.
- [6] B. Ellul, D. Camilleri, J. Grech, M. Muscat, "ilament wound composite pressure vessels and pipes subject to an internal pressure: an experimental and material characterization study," *Journal of Pressure Vessel Technology. Trans. ASME*, vol. 138, pp. 1-8, 2016.
- [7] N. H. Kim, E. B. Lee, H. H. An, K. B. Shin, "Evaluation of structural integrity of 6.8L composite pressure vessel manufactured by domestic carbon fiber." *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, vol. 38, no. 12, pp. 953-958, 2021.
- [8] N. H. Kim, E. B. Lee, H. H. An, K. B. Shin, "Research on laminate design parameters to maximize performance index of composite pressure vessel." *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 22, no. 3, pp. 21-27, 2018.