

필라멘트 와인딩 공법을 적용한 타입 IV 수소 압력용기 설계 연구

안성진¹ · 박현범^{1,†}

¹군산대학교 기계공학부

A Study on Design of Type IV Hydrogen Pressure Vessels with Filament Winding Method

Sungjin Ahn¹, Hyunbum Park^{1,†}

¹School of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

In this study, designing of a Type 4 pressure vessel using the filament winding method was conducted. In order to prevent leakage in consideration of the design of the hydrogen storage tank, a liner was designed by applying high-density polyethylene (HDPE), and the composite structure was designed by stacking carbon/epoxy in the hoop and helical directions. As a theoretical approach, the angle of the helical fiber and fiber thickness of each hoop and helix were designed. The safety of the design was verified using the commercial software ANSYS.

초 록

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공법을 적용한 Type 4 압력용기의 설계를 수행하였다. 수소저장용 탱크의 설계인 점을 고려하여 누설을 방지하기 위해 라이너는 고분자 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)을 적용하였고 복합재 구조는 카본/에폭시를 Hoop 방향과 Helical 방향으로 적층하여 설계하였다. 이론적 접근으로 Helical 섬유 각도와 Hoop, Helical 각각의 섬유 두께를 결정하여 설계하였다. 설계에 대한 안전성은 상용소프트웨어인 ANSYS를 활용하여 유한요소 해석으로 검증하였다.

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

1. 서 론

항공 우주 및 자동차 분야에서 경량화와 친환경적 요소는 핵심 연구 분야이다. 중량의 큰 비중을 차지하는 연료탱크에 탄소섬유 복합재료의 적용과 친환경 연료인 수소 연료의 사용이 증가하면서 수소 연료 탱크의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

카본/ 에폭시 복합재료는 무게가 가벼워 운송수단 구조물의 경량화에 탁월한 효과가 있다. 또한 금속재

압력용기 대비 복합재 압력용기는 강한 내식성을 가지고 있다. 복합재료 압력용기 제조 공법은 필라멘트 와인딩이 대표적인 공법으로 최근 압력용기 제작에 대부분 필라멘트 와인딩 공법이 적용된다.

최근 국외의 연구 동향으로 Roham Rafiee 등은 2018년에 복합재료 압력용기의 제조 불확실성을 고려한 과열압력 예측 실험을 수행하였다[1]. Lei Zu 등은 2019년에 비측지선 경로를 기반으로 복합재 압력용기를 설계하였다[2]. Shah Alam 등은 2020년에 Type 4 압력용기를 최적화 설계하고 이를 해석을 통해 검증하였다[3]. Osman Kartav 등은 2021년에 고압 수소 저장을 위한 복합재료 COPV(overwrapped pressure

Received: Oct. 11, 2023 Revised: Nov. 11, 2023 Accepted: Nov. 17, 2023

† Corresponding Author

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

© The Society for Aerospace System Engineering

vessel)에 대한 설계 및 해석을 수행하였다[4].

국내 연구를 분석한 결과 정승민 등은 2017년에 복합재 압력용기의 구조 성능 및 품질 향상을 위한 공정 변수 최적화 연구를 수행하였다[5]. 조성민 등 7명은 2017년에 CNG 용 탄소, 유리 섬유 하이브리드 복합재 용기 개발에 대한 연구를 수행하였다[6]. 김병선 등 3명은 2021년에 필라멘트 와인딩 공정에 의한 차량용 천연가스 압력용기에 대한 연구를 수행하였다[7]. 강연태 등 5명은 2023년에 고압 수소 저장용 복합재 압력용기의 경화 과정 최적 설계에 대한 연구를 수행하였다[8]. 박진영 등 2명은 2023년에 고전적층이론을 적용한 복합재 압력용기의 복합적층 설계에 관한 연구를 수행하였다[9].

선행 연구 분석 결과 복합재 압력용기는 경량화에 유리하고 내식성이 우수하다. 또한 파괴 양상에 있어서 폭발의 형태가 아닌 단계적 파손이 되므로 내부 기체 누출의 형태로 이루어진다. 따라서 파괴 안전성의 특징을 가지고 있어 금속용기 대비 뛰어난 강점을 지니고 있다[10]. 본 연구에서는 수소 저장용 복합재 압력용기의 제작 공법을 고려하여 구조 설계 및 해석을 수행하였다.

2. 구조 설계

압력용기는 총 5가지 형태로 분류되며, Types 1은 모든 구조가 금속재로 구성된 형태, 2는 금속재 라이너의 실린더에 유리섬유 복합재를 보강한 형태, 3은 알루미늄 라이너 전체에 탄소섬유 복합재를 보강한 형태, 그리고 4는 플라스틱과 같은 비금속 라이너 전체에 탄소섬유 복합재를 보강한 형태, 5는 분리형 라이너에 복합재를 적층하면서 단계적으로 라이너를 제거하여 라이너 없이 복합재로만 구성된 압력용기를 제작하는 형태이다.

본 연구에서는 타입 4 압력용기 설계를 진행하였다. 입자가 작은 수소 연료의 누설을 방지하기 위하여 라이너는 고분자 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)을 적용하였고 복합재료는 탄소섬유를 Hoop과 Helical 방향으로 둘과 실린더 부분을 포함한 압력용기 전체에 일정한 두께를 가지는 형상으로 적층하여 설계하였다.

설계 형상 구현을 위한 공정으로는 AFP(Automated fiber placement)가 있다. AFP는 자동 적층 공정 방법이다. AFP Head가 복합재료를 몰드에 최적의 각도로 조절하여 적층하고, 압축 롤러가 낮은 다공성을 보장하기 위해 적층된 복합재료를 한 번 더 압착해주는 구조 형태로 이루어진 자동화 기계이다. 이 기계는 6축 운동이 자유로워 본 연구에서 Dome 부분의 Hoop layer 적층을 구현하기에 적합하다. 필라멘트 와인딩 공법의 Carriage에 AFP Head를 결합하여 제작하면 본 연구를 통한 설계 결과를 반영하여 적층이 가능하다.

필라멘트 와인딩은 심축 위에 함침된 섬유를 일정 각도로 감아서 제작하는 방법이다. 대표적으로 Hoop와 Helical 방향으로 감싸서 압력용기의 형상을 제작하는 데 Helical 방향의 섬유 각도와 전체 섬유의 두께가 압력용기의 안전성을 결정한다.

초기 설계 과정으로 섬유의 각도와 각각의 섬유 두께를 이론적 접근으로 결정하였다. 첫 번째로 섬유의 응력을 결정하는 개념을 아래 식 1에 제시하였다.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{PR}{e} \\ \sigma_y &= \frac{PR}{2e}\end{aligned}\quad (1)$$

위의 식 1은 원주 방향 응력 σ_x 와 축 방향 응력 σ_y 를 나타내는 식이다. 내압과 실린더 직경, 복합재료의 두께와 축 방향 섬유의 응력과 원주 방향 섬유의 응력과 관계를 각각 나타내고 있다.

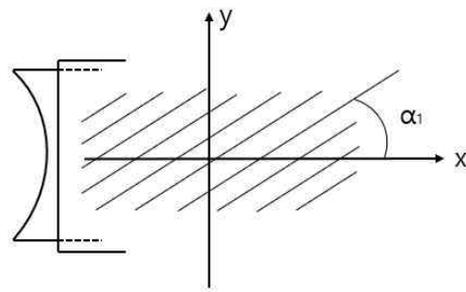


Fig. 1 Pressure Vessel from Perspective of x, y Plane

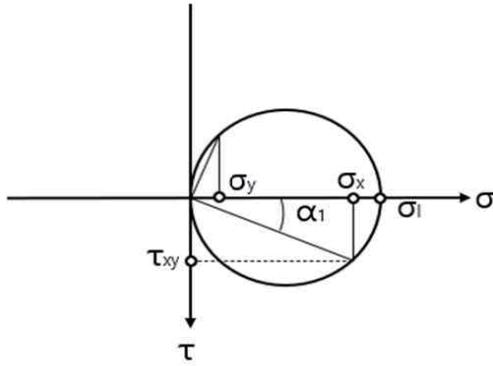


Fig. 2 Axial and Circumferential Stresses in Mohr's Circle

축 방향 x를 수직응력, 원주 방향 y를 전단응력으로 두고 모어의 원으로 x, y 평면의 응력 상태에 대해 구하면 Fig. 1과 같아진다. σ_x 와 σ_y 관한 식을 정리해보면 아래와 같아진다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_l \cos^2 \alpha_1 ; \sigma_y = \sigma_l \sin^2 \alpha_1 \\ \sigma_l \sin^2 \alpha &= \frac{PR}{e} \\ \sigma_l \cos^2 \alpha &= \frac{PR}{2e} \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식 2를 정리하면 축 방향 응력과 원주 방향 응력은 2배로 이를 고려하면 최적의 섬유 각도 α_1 은 54.74도가 나온다. 이는 돔 형태를 고려하지 않는 고압가스 수송관과 같은 양 끝단이 연속적인 형상의 이상적인 와인딩 각도로 압력용기와 같은 구조에는 적합하지 않다.

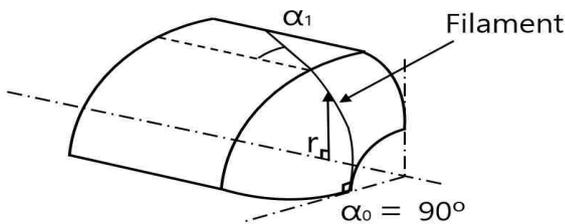


Fig. 3 Winding Angle of Pressure Vessel for Composite Material

Figure 3을 통해 돔 형태를 고려한 Helical 방향 섬유의 각도를 구할 수 있다. Fig. 3은 Head의 외경의

반지름 r_0 와 Body의 외경의 반지름 R 과 헬리컬 방향 섬유의 각도 α_1 과의 관계를 나타낸 그림이다. 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\sin^2 \alpha_1 = \frac{r_0}{R} \quad (3)$$

식 2의 Helical, Hoop 방향 섬유의 받는 힘과 x, y 축의 전체 힘을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{x1} \times e_1 \times 1 + \sigma_{x2} \times e_2 \times 1 &= \sigma_{ox} \times e \times 1 \\ e_1 \times \cos^2 \alpha_1 \times \sigma_{l1} &= e \sigma_{ox} = \frac{PR}{2} \\ e_1 &= \frac{P}{\sigma_{l1}} \times \frac{R}{2 \cos^2 \alpha_1} \end{aligned} \quad (4)$$

σ_{x1} 은 Helical 섬유가 담당하는 축 방향 하중을 의미하고 σ_{x2} 는 Hoop 방향 섬유가 받는 축 방향 하중을 의미한다. e_1 은 Helical 방향 섬유의 두께를 의미하고 e_2 는 Hoop 방향 섬유의 두께를 의미한다. 필라멘트 와인딩에서는 섬유 방향 섬유가 담당하는 하중 외에 모재가 담당할 수 있는 응력이 상대적으로 작기 때문에 축방향에 수직으로 배치된 Hoop 방향 섬유의 응력 σ_{x2} 는 0으로 가정하고 식 2에서 나온 x축 응력의 값을 대입하면 식 4와 같이 표현되고 Helical 방향 섬유의 두께를 구할 수 있다. 같은 방법으로 Hoop 방향 섬유의 두께를 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{y1} \times e_1 \times 1 + \sigma_{y2} \times e_2 \times 1 &= \sigma_{oy} \times e \times 1 \\ e_1 \times \sin^2 \alpha_1 \times \sigma_{l1} + e_2 \times \sigma_{l2} &= e \sigma_{oy} = PR \\ e_2 &= \frac{P}{\sigma_{l2}} \times R \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_1}{2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

각 섬유의 두께는 내압, 실린더의 반지름, 헬리컬 섬유의 각도에 영향을 받고 결정된다. 이때 압력용기를 감싸는 섬유는 단일 유형이므로 모두 동일한 최대 장력을 받을 수 있다. 그러므로 압력용기 전체의 최소 두께는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{(rupture)} = \sigma_{l1} = \sigma_{l2}$$

$$e_{min} = \frac{3}{2} \times \frac{PR}{\sigma_{l(rupture)}} \quad (6)$$

위의 식 6에서 제시한 두께는 이론상 최소 두께로 실제 설계에서 적합하지 않을 수 있다. 본 연구에서는 이론적으로 도출된 결과를 바탕으로 설계 및 해석을 수행하여 구조적 안전성을 검토하고 불안정한 구조적 요소를 보완하여 설계하였다.

Table 1 Pressure Vessel Design Requirements

Body radius (R)	280mm
Head radius (r_0)	75mm
Working pressure (P_w)	45MPa
maximum expected operating pressure (P_m)	67.5MPa
Burst pressure (P_b)	135MPa
Maximum Tensile stress of fiber ($\sigma_{l(rupture)}$)	2950MPa
Maximum Tensile stress of fiber	-1450Mpa

Table 2 Design Specifications for Composite Pressure Vessel

Helical fiber angle (α_1)	15.5°
thickness of Helical layer (e_1)	5.9mm
thickness of Hoop layer (e_2)	12.3mm
Number of Helical layer	8ply
Number of Hoop layer	16ply

위의 표 1은 설계하고자 하는 압력용기의 요구되는 규격으로 설계 요구 조건이다. 표 2는 앞서 제시한 이론식을 바탕으로 압력용기를 설계한 결과이다.

Figure. 4는 표 1, 2의 값들로 설계된 압력용기를 해석의 편의성을 위해 135MPa의 파괴압력조건에서 해석한 결과 중에서 인장응력이 최댓값에 해당하는 그림이다. 해석은 상용 프로그램인 ANSYS의 ACP를 통하여 구조해석을 수행하였다. ACP는 복합재료 전처리 프로그램으로 전처리 과정을 수행하는 ACP(Pre)로

복합재료 적층을 정의하였고 후처리를 담당하는 ACP(Post)로 적층된 모델을 연결된 구조해석 시스템에서 경계조건 및 하중조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 경계조건은 양쪽 보스 끝부분을 완전 구속하였고 총 노드 수 150,280이고 요소는 143,650개이다. 해석 결과에서 응력 최댓값은 약 3.14GPa로 섬유 최대 인장 강도의 6.7%에 해당하는 값인 198MPa이 초과하는 값이다. 실린더에서 최대 응력 값이 도출되는 것으로 판단되어 Hoop layer의 추가 적층이 필요하다고 판단하였다. 개선되어 구조적 안전성이 충족되면서 경량화에 최적화된 적층 모델을 구현하기 위해 Hoop layer를 1ply씩 추가하여 해석을 진행한 결과 2ply를 추가하는 것이 적층을 최소화하고 동시에 구조적으로 안전하였다. 최종적으로 Helical layer 8ply, Hoop layer 18ply로 설계한 압력용기의 해석 결과는 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 파괴압력 135MPa에서 최대 응력이 2826.1MPa로 복합재료의 인장 강도인 2950MPa를 넘지 않아 안전한 것으로 확인하였고 추가 적층으로 인해 기존 질량 113.43kg에서 4.93kg 증가하여 전체 질량은 118.36kg인 것으로 확인하였다.

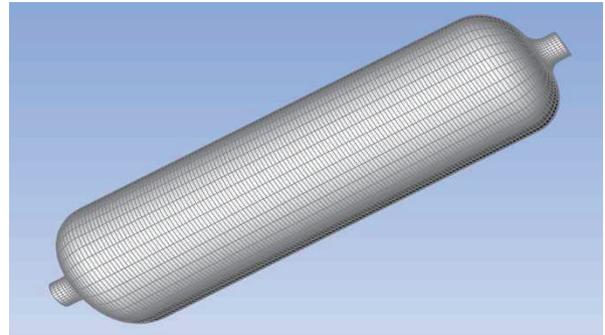


Fig. 4 Pressure Vessel Element Modeling

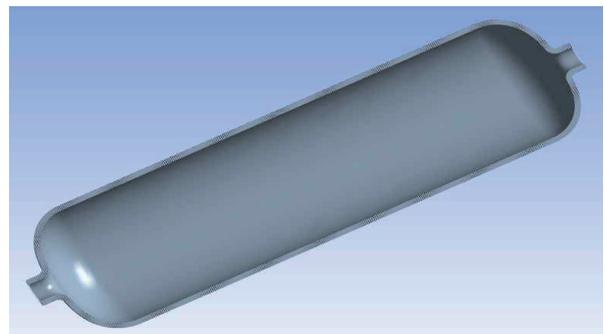


Fig. 5 Cross-sectional area of pressure vessels laminated with composite

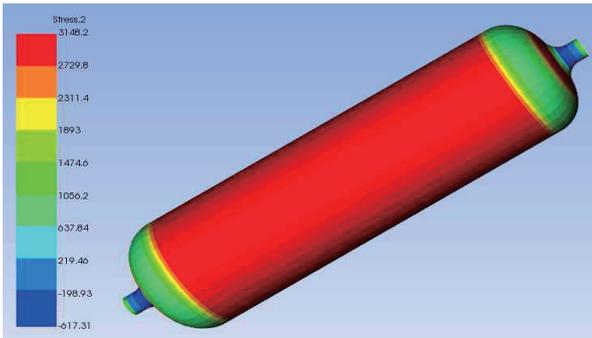


Fig. 6 Analysis Result of Bust Pressure : Initial Design(MPa)

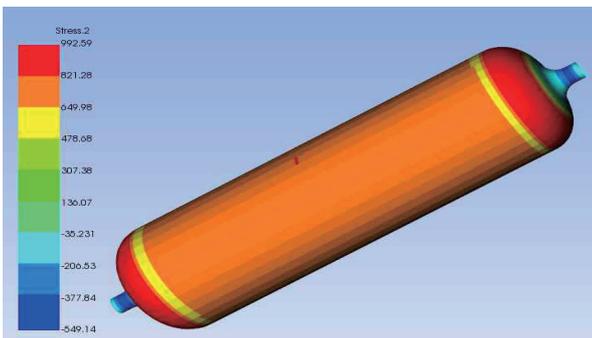


Fig. 7 Analysis Result of Working Pressure : Last Design(MPa)

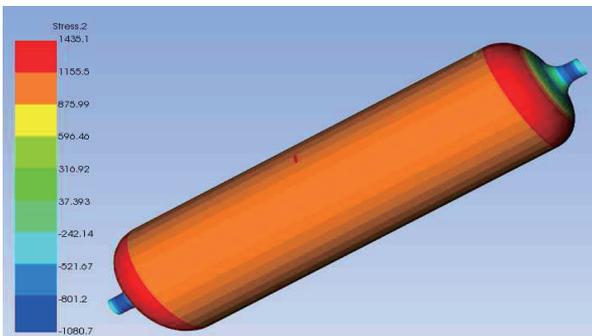


Fig. 8 Analysis Result of Maximum Expected Operating Pressure : Last Design (MPa)

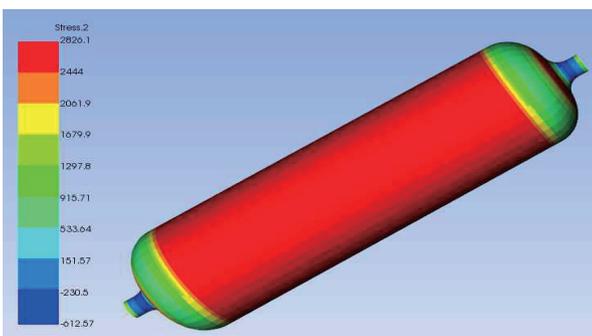


Fig. 9 Analysis Result of Bust Pressure : Last Design(MPa)

3. 결 론

본 연구에서는 복합재료 압력용기의 설계 및 구조 해석을 통하여 안전성을 확인하는 연구를 수행하였다. 압력용기는 수소 저장용으로 비금속 라이너 위에 탄소 섬유를 감싸 제작되는 Type 4 형태로 설계되었다. 라이너는 수소의 누설을 고려하여 고분자 고밀도 폴리에틸렌으로 설계하였다. 먼저 이론적 접근으로 내압을 받는 최적의 섬유 각도와 복합재료의 두께를 선정하여 설계를 진행하였다. Helical 섬유의 최적의 각도는 15.5도이고 섬유의 두께는 Helical이 5.9mm, Hoop 방향이 12.3mm로 섬유 1ply의 두께가 0.8mm인 점을 고려할 때 구조적 안전성에 충족하는 layer는 각각 8ply, 16ply이다. 설계된 압력용기를 파괴압력으로 해석을 진행한 결과는 최대 응력 값이 3.14GPa로 탄소 섬유의 최대인장강도인 2950MPa의 6.7%에 해당하는 값인 198MPa이 초과하는 값이다. 구조적 안전성과 경량화를 고려하여 추가 적층을 진행하였다. 추가 적층은 Hoop layer의 실린더 부의 압력이 최대인 점을 고려하여 Hoop 방향 섬유를 1ply씩 추가 적층하여 해석을 진행하였다. 2ply를 추가 적층하여 해석한 결과 작동압력 45MPa에서는 최대 992.59MPa의 인장응력을 보였고 최대허용응력 67.5MPa에서는 최대 1435.1MPa의 인장응력을 보였다. 최종 파괴압력에서는 최대 인장 응력 값이 2826.1MPa로서 탄소섬유의 최대 인장 강도인 2950MPa보다 낮은 응력이므로 구조적으로 충분히 안전한 설계 결과인 것으로 검토되었다.

후 기

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임.(2023R1A6C101B042) / 이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224000000040).

References

- [1] O. Kartav, S. Kangal, K. Yüçetürk, M. Tanoğlu, E. Aktaş, and H. S. Artem, "Development and analysis of composite overwrapped pressure vessels for hydrogen storage," *Journal of Composite Materials*, vol. 55, July 2021.
- [2] S. Alam, G. R. Yandek, R. C. Lee, J. M. Mabry, "Design and development of a filament wound composite overwrapped pressure vessel," *Composites Part C: Open Access*, vol. 2, October 2020.
- [3] L. Zu, H. Xu, H. Wang, B. Zhang, B. Zi, "Design and analysis of filament-wound composite pressure vessels based on non-geodesic winding," *Composite Structures*, vol. 207, Pages 41-52, January 2019.
- [4] R. Rafiee, M. A. Torabi, "Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels," *Composite Structures*, vol. 185, Pages 573-583, February 2018.
- [5] S. M. jung, B. Y. Park and T. K. Hwang, "Study on Optimizing Manufacturing Parameters for a Composite Pressure Vessel to Improve Structural Performance and Quality," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, vol. 4, pp. 1,171-1,178, December 2014.
- [6] S. M. Cho, M. S. Cho, G. S. Jung, S. K. Lee, S. K. Lee, K. D. Park, S. K. Lyu, "A Study on the Development of a Hybrid Fiber Reinforced Composite for a Type 4 CNG Vessel," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, vol. 16, pp. 97-103, July 2017.
- [7] Y. T. Kang, G. Y. Park, H. S. Kwak, H. N. Qi, C. Kim, "Optimal design of curing process for manufacturing a high pressure hydrogen vessel (type 4)," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 37, pp. 3,495-3505, 2023.
- [8] G. Y. Park, Y. T. Kang, C. H. Lee, C. Kim, "A Study on Design of Composite Layer using Classical Lamination Theory (CLT) for Hydrogen Pressure Vessel," *Korean Society for Precision Engineering*, pp. 293-293, May 2021.
- [9] Y. B. Yoon, S. W. Cho, S. K. Ha, "Optimal Design of Filament Wound Composite CNG Pressure Vessel," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, pp. 23-30, 2002.