

두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려한 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석

김철웅* · 박재성* · 홍창선* · 김천곤*

Analysis of Filament Wound Pressure Tank Considering Winding Angle Variation in Thickness Direction

C.U. Kim, J.S. Park, C.S. Hong and C.G. Kim

KEY WORDS : Filament Wound Pressure Tank, Semi-Geodesic Path Equation, ABAQUS, FEM

ABSTRACT

Filament wound pressure vessels have been studied for the efficient design tool to consider the variation of fiber angles through-the thickness direction. Filament winding patterns were simulated from semi-geodesic fiber path equation to calculate fiber path on arbitrary surface.

Finite element analyses were performed considering fiber angle variation in longitudinal and thickness directions by ABAQUS. For the finite element modeling of the pressure tank, the 3-dimensional layered solid element was utilized. From the stress results of pressure tanks, maximum stress criterion in transverse direction was applied to modify material properties for failed region. In the end of each load increment, resultant layer stresses were compared with a failure criterion and properties were reduced to 1/10 for a failed layer. Results of progressive failure analysis were compared with two experimental data.

1. 서론

필라멘트 와인딩 된 압력탱크는 크게 실린더, 돔, 접속부분 그리고 금속재 보스(boss) 등으로 나눌 수 있는데(그림 1), 이중 실린더 부분은 플러스와 마이너스의 적층각이 교대로 반복해서 쌓이는 균형적층(balanced laminate)의 형태를 나타내며 내압으로 인한 원주 방향으로의 취약성을 보강해 주기 위한 후프와인딩층이 존재한다. 돔 부분은 실린더 부분에서부터 보스에 이르기까지 곡률이 연속적으로 변하는 곳으로 제작 특성상 실린더에서 돔부위에 이르기까지 두께와 자오선에 대한 섬유 각도가 연속적으로 변한다. 또한, 돔 부분에서는 와인딩의 진행에 따라서 와인딩이 되어지는 표면 형상이 연속적으로 변함으로 인하여, 두께 방향으로 와인딩 각도가 변하게 된다.

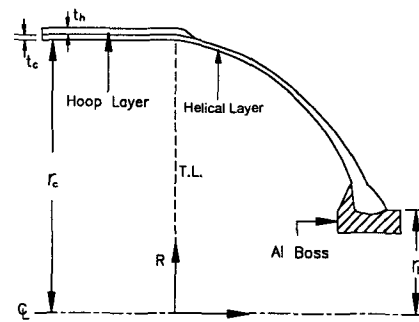


Fig 1. Cross-section of filament wound pressure tank

필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석은 구조물의 축대칭 성질을 이용한 해석이 이루어져 왔다. Uemura [1]는 인공위성용의 2 단 복합재 연소관을 개발하면서 등장력 돔 형상 연소관의 비선형 해석을 수행하였다. 황태경 등[2]은 축대칭 고체 요소를 사용하여 비선형 해석을 수행하고 실험결과와 비교 하였다. Lifshitz [3]는 고전 적층판 이론과

* 한국과학기술원 기계공학과(항공우주공학전공)

Tsai-Wu 파손 이론에 근거하여 두꺼운 금속재 라이너(liner)를 가진 압력탱크의 해석을 수행하였으며, 역시 실린더와 돔 부분을 모두 균형적층으로 가정하였다. 도영대 [4]는 등장력돔 형상의 압력탱크의 비선형 해석을 8 절점 응축셀요소를 이용하여 수행하였으며, 와인딩의 안정성을 만족시키는 돔 형상의 압력탱크에 대해서 재료비선형(materially nonlinear)을 고려한 점진적 파손해석을 수행하고, 수압 실험과의 결과를 비교하였다.

필라멘트 와인딩 된 압력탱크에 대한 이상의 연구들을 종합해 보면, 축대칭 해석과 비선형 해석에 관한 연구는 비교적 많이 진행되어 왔다. 하지만, 기존의 연구들은 해석을 수행할 때 제한된 설계 기법(등장력 돔의 설계, planar wound 돔의 설계, 와인딩의 안정성을 만족시키는 설계)을 사용함에 따라서, 돔 부분을 실린더 부분과 같이 균형적층으로 가정하였고, 이에 따라 돔 부분에서 발생하는 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려하지 못했다. 또한, 유한요소해석의 수행에 있어서 두께가 얇은 요소에 적합한 2차원 셀요소를 사용함으로써 접속부나 상대적으로 두께가 두꺼운 보스부분의 거동을 제대로 묘사하지 못하였고, 3차원 유효강성을 계산함으로써 해석의 전처리 시간이 많이 소요되는 축대칭 고체요소(axisymmetric solid element)를 사용하였다.

본 연구의 목적은 필라멘트 와인딩 된 압력탱크에 대하여 실제에 가까운 해석을 구현함으로써 주어진 설계요구조건(파손허용압력, 압력탱크 무게와 부피 등)에 적합한 와인딩 패턴과 설계변수의 값을 결정할 수 있는 방법을 확립하는데 있다. 이를 위하여 맨드릴 형상과 와인딩 path의 설계를 독립적으로 적용하였으며, 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 계산해 낼 수 있는 알고리즘을 구성하였다. 그리고, 층별 변형률과 응력의 해석이 가능하고 접속부분과 보스부분의 상세 모델링이 가능한 3차원 적층고체요소(3-dimensional layered solid element)를 사용하여 재료 비선형성을 고려한 유한요소해석을 수행하고 해석결과를 문헌에 주어진 실험데이터와 비교하였다.

2. 알고리즘 정립

도입한 수식

본 연구에서 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려하기 위해서 도입한 설계 기법은 semi-geodesic fiber path equation[5]이다. Semi-geodesic fiber path equation은 임의의 형상 표면 위에 필라멘트 와인딩이 이루어질 때 레진의 점성을 고려하여 어떤 path로 와인딩이 될 것인가를 계산해 내는 설계 기법으로 식 (1)과 같다.

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{\lambda(A^2 \sin^2 \alpha - rr'' \cos^2 \alpha) - r'A^2 \sin \alpha}{rA^2 \cos \alpha} \quad (1)$$

여기서, x, r 은 각각 축방향과 반경방향의 매개변수, α 는 와인딩 각도, $A = \sqrt{1+r'^2}$ 이다. 돔 형상은 축대칭 이므로, (r, x) 의 표면 형상 정보만 주어지면, 돔의 자오선을 따라 와인딩 각도를 계산할 수 있다.

식 (1)을 도입하여 돔 부분의 와인딩 각도를 계산하면 두께를 계산할 수 있다. 이를 위해서는 다음의 두 가지 가정이 필요하다. 첫째, 섬유 함유율이 일정하다. 둘째, 돔 부분을 자오선의 수직(gradient) 방향으로 잘랐을 때 그 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정하다. 이와 같은 두가지 가정을 이용하면 두께 공식이 다음과 같이 쉽게 유도된다.[4]

$$t = \frac{r_c \cos \alpha_c}{r \cos \alpha} \times t_c \quad (2)$$

여기서, r_c, α_c, t_c 는 각각 실린더 부분의 반경, 와인딩 각도와 헬리컬층 두께이다.

알고리즘 정립

두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려하기 위하여 본 연구에서 정립한 알고리즘을 flow chart로 표현한 것이 그림 2와 같다.

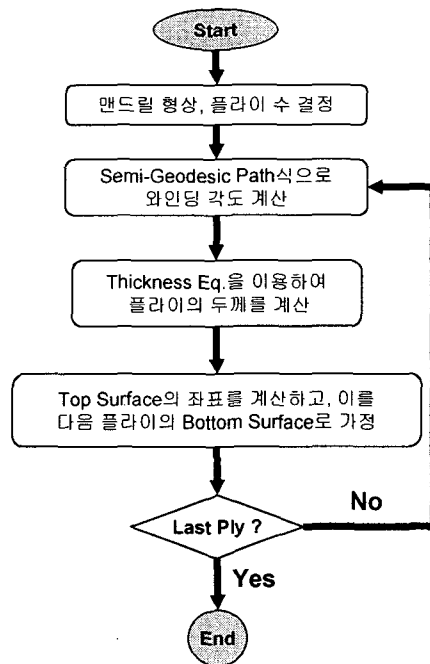


Fig 2. Flow chart of algorithm for considering the winding angle variation in thickness direction

3. 압력탱크 비선형 해석

해석 모델과 방법

3 차원 적층고체요소를 사용한 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 비선형 해석을 위해서 도입한 모델은 ASTEB(Advanced Standard Test Evaluation Bottle) [2]이다. 적용된 T800/Epoxy 의 물성치는 다음과 같다.

$E_1 = 161.3 \text{ GPa}$, $E_2, E_3 = 8.820 \text{ GPa}$, $G_{12}, G_{13} = 5.331 \text{ Gpa}$, $G_{23} = 2.744 \text{ Gpa}$, $\nu_{12}, \nu_{13} = 0.33$, $\nu_{23} = 0.45$, $X_t = 2300 \text{ MPa}$, $X_c = 1080 \text{ MPa}$, $Y_t = 30 \text{ MPa}$, $Y_c = 70 \text{ MPa}$

해석의 전처리 과정의 편의를 위해서 그래픽 유저 인터페이스를 개발하였고, 개발된 GUI는 그림 3 과 같다.

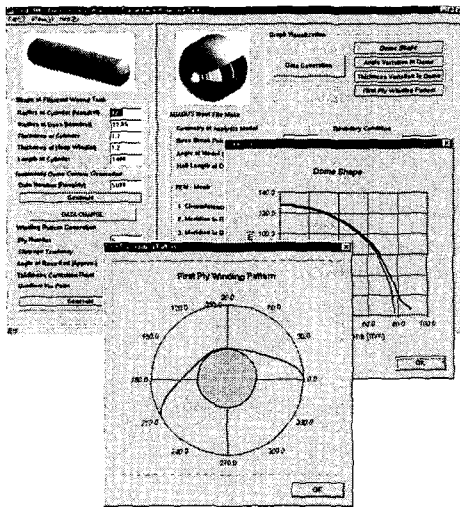


Fig 3. Graphic User Interface - PreAft2000

해석을 위한 유한요소모델링은 그림 4 과 같다. 압력탱크의 와인딩 패턴은 문헌[2]에 주어진 실험 데이터와의 비교를 위하여 동일하게 맞추었고, 실린더 부분의 와인딩 각도 27.5°를 만족시키기 위하여 slippage tendency 값을 전방돔과 후방돔에 각각 -0.103, 0.116로 적용한 요소정보를 사용하였다.

보스 부분은 금속재 보스(metal boss)가 첨가된 경우와 같은 경계 조건을 모사하기 위하여 ABAQUS 의 *EQUATION 경계조건을 사용하였다. 그리고, 압력탱크의 내부 압력은 실험 데이터와의 비교를 위하여 2000 psi(13.79 MPa)로 하였다.

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 파

손이 지배적인 파손으로 나타나고, 최종적으로는 섬유 파손에 의해 구조물 파괴가 발생된다.[2] 따라서, 재료 비선형성을 고려한 파손해석을 하기 위해서는 이러한 초기 모재 파손 이후의 거동을 예측해야한다. 본 연구에서는 재료 비선형성을 고려한 파손해석을 위하여 상용프로그램 ABAQUS 의 유저 서브루틴(user subroutine)을 프로그래밍하였다. 사용한 파손이론은 최대응력파손이론이며, 층별 모재 파손후의 물성 저하률(degradation factor)은 0.1로 두었다.

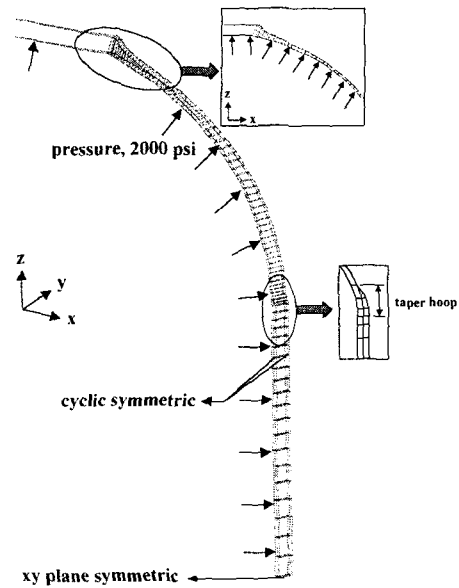


Fig 4. Finite element model and boundary conditions

해석 결과의 분석과 실험 데이터와의 비교

그림 5는 하중이 2000 psi 일때 재료 비선형성을 고려한 해석과 기하학적 비선형(geometrically nonlinear)만을 고려한 해석의 압력탱크 윗면(top surface)의 섬유방향 변형률의 결과를 실험 데이터와 함께 비교한 그래프이다. 실험 데이터와 해석 결과는 전·후방돔 모두에서 보스에서 실린더에 이르는 전 부분에 걸쳐서 그 경향이 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 재료 비선형성을 고려한 경우가 기하학적 비선형만을 고려한 해석의 경우보다 실험 데이터와 더 일치하는 결과를 보인다. 따라서, 기하학적 비선형만을 고려한 해석의 경우에는 모재 파손을 고려하지 않았기 때문에 재료 비선형성을 고려한 해석의 경우보다 섬유방향 변형률이 전체적으로 낮게 계산되는 것으로 분석된다.

그런데, 섬유방향 변형률은 전방돔과 후방돔에서 경향이 다소 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 특히, 접속 부분에서의 경향에 있어 전방돔의 경우에는 응력 집중이 발생하지 않는 반면에 후방돔에서는 실린더 부분보다도 높은 응력이 집중되는 것

을 볼 수 있다. 응력 불연속성을 막기 위하여 돔의 일부분까지 후프 와인딩 층을 보강했음에도 불구하고 이러한 높은 응력집중이 발생하는 이유는 후방돔이 전방돔에 비하여 상대적으로 반경비(r_b/r_c)가 크기 때문으로 분석할 수 있다. 후방돔은 전방돔보다 반경비가 크기 때문에 같은 하중에 대해서 상대적으로 반경방향으로의 하중 성분이 크게 되고, 그에 따라서 반경방향으로의 접속부분에 걸리는 굽힘효과(bending effect)가 커지게 되고, 접속 부분에 걸리는 응력 집중도 커진다고 분석된다.

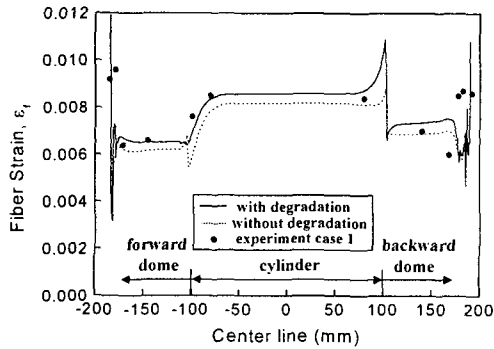


Fig 5. Comparison of fiber strains between analysis and experiment of the ASTEB (p = 2000 psi)

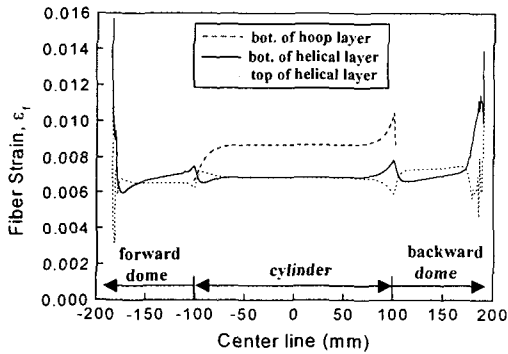


Fig 6. Comparison of fiber strains of the ASTEB (p = 2000 psi)

최종 파손 지점의 예측

압력탱크의 파손 압력을 구하기 위해서는 섬유 방향의 응력이 최대인 지점을 찾아야 한다. 그런데, 압력탱크의 두께 방향 위치 중에서 섬유 방향 응력이 최대가 될 수 있는 지점은 그림 1의 압력탱크 개요로부터 압력탱크 전체의 바닥면, 헬리컬 층의 윗면, 후프 와인딩층의 바닥면, 후프 와인딩 층의 윗면 등 모두 네 지점 이라고 할 수 있다. 그런데, 후프 와인딩층은 섬유가 원주방향으로 보강되었기 때문에 항상 바닥면의 응력이 윗면의 응력보다 크게 된다. 따라서, 최종 파손 압력을 구하기 위해서는 모두 세 지점의 응력을 비교해 보아야 한다.

그림 6은 압력탱크의 바닥면과 헬리컬층의 윗

면, 후프 와인딩 층의 바닥면에서의 섬유방향 변형률(fiber strain)을 비교한 그래프이다. 그런데, 압력탱크의 각 위치별로 섬유방향 변형률이 최대인 지점이 동일하지 않다. 그러므로, 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 파손압력과 파손지점을 해석을 통해서 찾기 위해서는 바닥면과 헬리컬층의 윗면, 후프 와인딩층의 바닥면 등의 세 지점의 섬유방향 응력을 모두 비교해 보아야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 된 압력탱크에 대하여 기존 해석의 단점을 보완하고 실제에 가까운 해석을 구현하였다. 이를 위해서 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 계산하는 알고리즘을 구성하였으며, 재료비선형성을 고려한 유한요소해석을 3차원 적층고체요소를 사용하여 수행하였다. 그 결과, 재료비선형성을 고려한 해석이 기하학적 비선형성만을 고려한 해석보다 섬유 방향 응력을 전체적으로 높게 평가하며, 실험 결과와의 비교에서도 더 일치하였다. 또한, 압력탱크의 최종 파손은 헬리컬층의 바닥면, 헬리컬층의 윗면, 후프 와인딩 층의 바닥면의 세 지점에서 발생할 수 있으며, 파손 위치는 해석을 통해서 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 항공우주연구소가 지원하는 연구과제로 수행한 것이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. M. Uemura, "CFRP 로켓 모터의 개발연구," 동경 대학 우주항공연구소보고 제 15 권 제 4 호, 1979
2. 황태경 외, "필라멘트 와인딩 압력용기의 구조 설계 변수 해석을 통한 복합재 연소관의 성능 향상에 관한 연구," 제 8 차 유도무기학술대회논문집, 1998
3. J. M. Lifshitz, "Filament-wound pressure vessel with thick metal liner," *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 313-323
4. Y. D. Doh, and C. S. Hong, "Progressive Failure Analysis for Filament Wound Pressure Vessel", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 14, No. 12, pp.1278-1306, 1995
5. J. Scholliers and H. Van Brussel, "Computer-integrated filament winding: computer-integrated design, robotic filament winding and robotic quality control," *Composites Manufacturing*, Vol.5, No. 1, 1994, pp. 15-23