

論文

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 **

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.

초 록

본 논문에서는 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려한 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석을 수행하였다. 두께 방향의 와인딩 각도를 고려하기 위하여 임의의 맨드릴 표면에 대한 필라멘트 와인딩 궤적을 찾아낼 수 있는 semi-geodesic path식을 도입하였다.

필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 유한요소 모델링을 위하여 3차원 적층고체요소를 사용하였으며, 상용프로그램 ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서는 모재 파손에 의한 강성저하를 모사하기 위하여 재료 비선형성을 고려하였으며, 이를 위하여 각 하중 증분 후에 섬유 수직방향 응력을 모재의 인장강도와 비교하는 최대응력파손이론을 도입하였고, 파손이 일어난 층에 대해서 모재 방향의 재료 상수를 1/10로 저하시켰다. 그리고, 점진적 파손해석을 수행한 결과를 문헌에 주어진 실험데이터와 비교하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과(항공우주공학전공) 박사과정

** 한국과학기술원 기계공학과(항공우주공학전공)

1. 서 론

필라멘트 와인딩 공법은 연속 섬유들을 맨드릴(mandrel) 위에 원하는 형태와 각도로 감아서 만드는 방법으로 전투기나 로켓의 외부 연료탱크, 로켓 모터케이스, 액체연료 로켓의 연료탱크 및 산화제탱크 등을 구성하는데 많이 사용되고 있다.

필라멘트 와인딩 된 압력탱크는 크게 실린더, 돔, 접속부분(junction part) 그리고 금속제 보스(boss) 등으로 나눌 수 있는데(Fig. 1), 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 방향으로 와인딩 각도가 변하게 된다.

필라멘트 와인딩 된 압력탱크에 대한 기존의 연구는 설계와 해석의 측면에서 각각 정리해 볼 수 있다.

먼저, Evans [1]는 복합재 연소관 설계에 관한 기본 개념을 제시하고 후프 와인딩의 필요성과 필라멘트 와인딩의 방법에 관해 정리하였다. 홍창선 등[2]은 netting 해석에 기초한 압력탱크 설계기법 및 파손해석을 연구하였다. 도영대 [3]는 여러가지 형상에 따른 압력탱크의 설계 기법을 정리하였다.

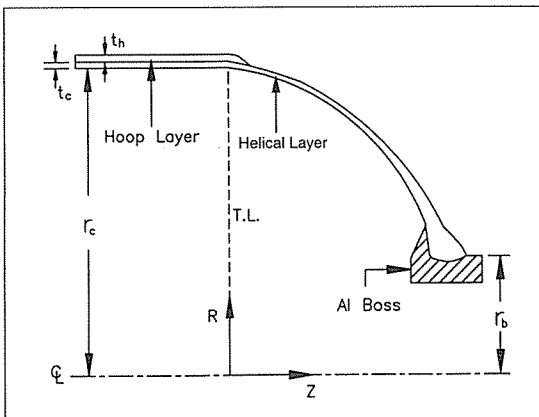


Fig. 1. Cross-section of a general filament wound pressure tank

필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석은 구조물의 축대칭 성질을 이용한 해석이 이루어져 왔다. Uemura [4]는 인공위성용의 2단 복합재 연소관을 개발하면서 등장력 돔 형상 연소관의 비선형 해석을 수행하였다. 황태경 등[5]은 축대칭 고체 요소를 사용하여 비선형 해석을 수행하고 실험결과와 비교 하였다. Lifshitz [6]는 고전 적층판 이론(classical laminated theory)과 Tsai-Wu 파손 이론에 근거하여 두꺼운 금속제 라이너(liner)를 가진 압력탱크의 해석을 수행하였으며, 역시 실린더와 돔 부분을 모두 균형적층으로 가정하였다. 도영대 [3]는 등장력돔 형상의 압력탱크의 비선형 해석을 8절점 응축요소로 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 방향으로의 와인딩 각도 변화를 고려 하지 못했다. 또한, 유한요소해석의 수행에 있어서 두께가 얇은 요소에 적합한 2차원 쉘요소를 사용함으로써 접속부위나 상대적으로 두께가 두꺼운 보스부분의 거동을 제대로 모사하지 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 결정 할 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, 여러가지 설계 변수의 값이 두께 방향의 와인딩 각도 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 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 문헌[5]에 주어진 실험데이터와 비교하였다.

2. 두께방향의 와인딩 각도 변화를 고려하기 위한 알고리즘

2.1 도입한 수식

2.1.1 Semi-Geodesic Path Equation

본 연구에서 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려하기 위해서 도입한 설계 기법은 semi-geodesic fiber path equation[7]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.

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

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

2.1.2 Thickness Equation

식 (1)을 도입하여 돔 부분의 와인딩 각도를 계산하면 두께를 계산 할 수 있다. 이를 위해서는 다음의 두 가지 가정이 필요하다. 첫째, 섬유의 함유율이 일정하다. 둘째, 돔 부분을 자오선의 수직(gradient) 방향으로 잘랐을 때 그 단면을 통과하는 섬유의 수가 일정하다. 이와 같은 두가지 가정을 이용하면 두께 공식이 식 (2)와 같이 쉽게 유도된다.[3]

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

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

2.2 알고리즘 정립

필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 해석을 위해서는 전체를 하나의 적층판(laminate)으로 보고 해석 할 수 밖에 없다. 따라서, 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 고려 하기 위해서는 각 플라이(ply)의 와인딩 각도를 따로 계산해야 한다. 이를 위해서 앞 절에서 언급했던 semi-geodesic path와 두께 공식을 적용하였다.

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

3. 설계인자가 두께 방향의 와인딩 각도 변화에 미치는 영향

3.1 도입한 모델과 비교 방법

필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 두께 방향의 와인딩

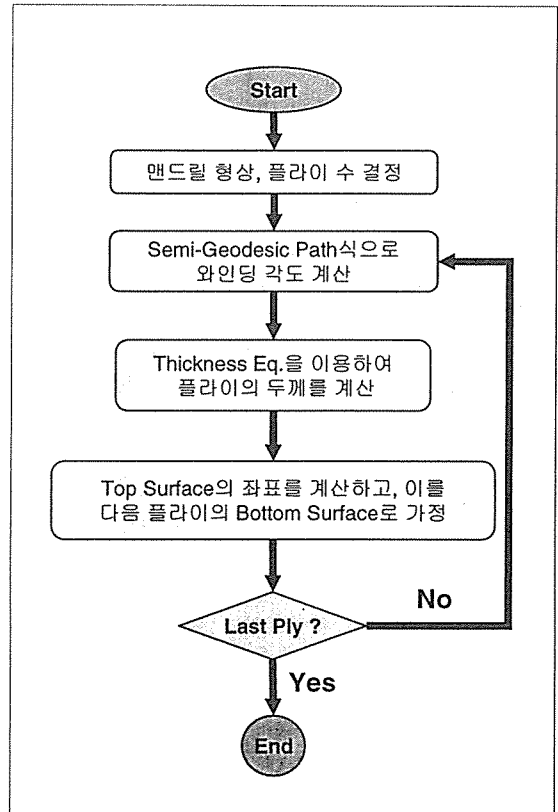


Fig 2. Flow chart of algorithm for considering the winding angle variation in thickness direction

Table 1. Configuration of several filament wound pressure tanks [mm]

	EXOS-B	STEB		ASTEB	
		Forward	After	Forward	After
Cylinder Radius, r_c	350.0	127.0		127.0	
Boss Radius, r_b	148.1	22.05	47.70	45.80	70.83
Cyl. Thickness, t_c	2.3	1.4		1.4	
Hoop winding, t_h	2.4	1.6		1.6	

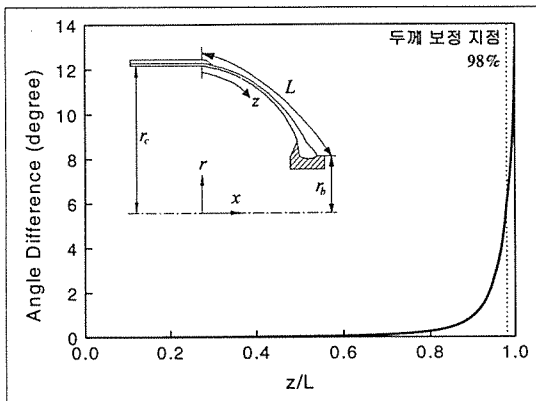


Fig. 3. Winding angle difference between first ply and last ply (EXOS-B)

각도 변화에 여러가지 설계 인자가 미치는 영향을 알아보기 위해서 도입한 일본 과학 위성 EXOS-B의 연소관 모델[4]이다. (Table. 1)

먼저, EXOS-B 연소관 모델의 형상 특성을 알아보기 위하여 slippage tendency를 0으로 두고 두께 방향의 와인딩 각도 변화를 계산 하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 자오선 방향의 거리 비율로 약 0.7의 지점에서부터 두께 방향의 와인딩 각도 변화가 나타나기 시작하며, 두께 보정 지점까지 첫 플라이와 마지막 플라이의 최대 와인딩 각도 차이는 약 6°정도가 된다. 기존의 연구 결과[8]를 통해서 알 수 있듯이, 압력탱크의 내부 압력에 대해서 가장 취약한 부분은 실린더와 돔 부분의 연결 부위와 금속재 보스에 가까운 부위이다. 그런데, 위의 결과로부터 보스 부분에 가까운 지점에서 두께 방향으로의 와인딩 각도의 변화가 크므로 이를 고려하여 해석을 수행하면 기존의 결과와 다른 거동을 보일 것을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 여러 가지 설계 인자의 영향을 알아보기 위해서 EXOS-B모델을 기본으로 하고, 한가지 설계 인자에 대해서 값을 변경하면서 비교를 수행하였

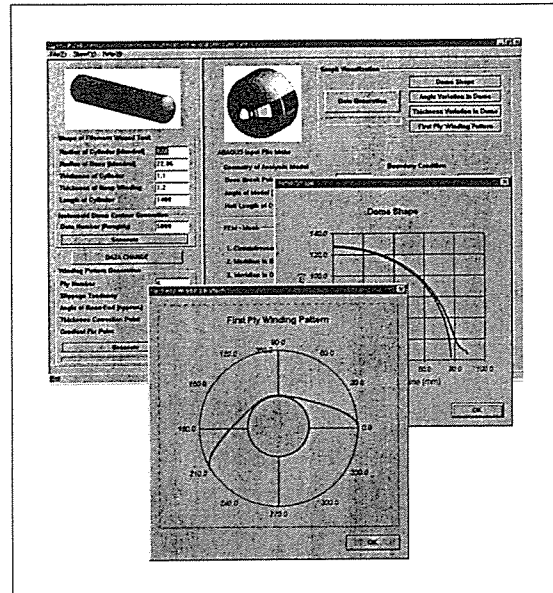


Fig. 4. Graphic User Interface - PreAft2000

다. 단, 설계 인자의 변경은 STEB(Standard Test Evaluation Bottle) [9] (Table. 1)과 ASTEB (Advanced Standard Test Evaluation Bottle) [5] (Table. 1)의 형상 비율에 기초 하였다. 또한, 반복 되는 계산의 시간을 단축하고 계산된 결과의 개요를 그래프로 바로 확인 할 수 있도록 Fig. 4와 같은 그래픽 유저 인터페이스(Graphic User Interface - GUI)를 프로그래밍하였다.

3.2 실린더 헬리컬층 두께(t_c)의 영향

EXOS-B 모델의 실린더 두께는 2.3 mm이다. 이를 STEB과 ASTEB의 실린더 반경(r_c) 대 실린더 헬리컬층 두께(t_c)의 비율에 맞추어서 3.86 mm과 3.03 mm로 변경 하여서, 두께 방향의 와인딩 각도의 변화를 계산해 보았다. 실린더 부분의 플라이 수는 섬유의 두께를 고려하여 EXOS-B는 12플라이, STEB은 20플라이, ASTEB은 16플라이로 가정하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 두께가 두꺼울수록 첫 플라이와 마지막 플라이의 와인딩 각도 차이가 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 실린더 헬리컬층의 두께가 두꺼우면 와인딩의 진행에 따라서 상대적으로 보스 부분의 두께 또한 상당히 증가함에 기인 한다고 분석 할 수 있다.

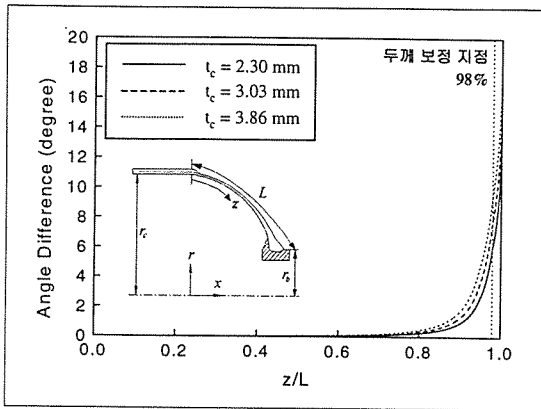


Fig. 5. Winding angle difference between first ply and last ply with various thicknesses of cylinder

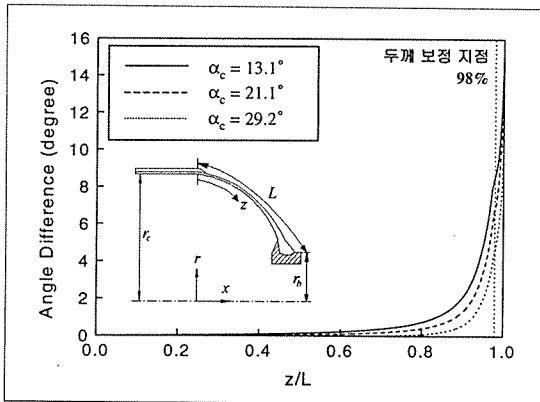


Fig. 6. Winding angle difference between first ply and last ply with various cylinder winding angles

3.3 실린더 부분 와인딩 각도(α_c)의 영향

실린더 부분 와인딩 각도(α_c)는 slippage tendency의 값과 밀접한 관계를 갖는다. 필라멘트 와인딩이 수행될 때에는 레진의 점성으로 인하여 섬유와 맨드릴 사이에 마찰력이 존재하므로 돔 부분에서는 일정 범위의 slippage tendency 값이 존재하게 된다.[10] 따라서, 압력탱크 제작자는 slippage tendency 값이 허용하는 범위내의 실린더 부분 와인딩 각도를 선택하여 와인딩을 할 수 있다.

그런데, 일반적인 slippage tendency의 최대 절대값은 0.2~0.34로 알려져 있다.[10] 따라서, slippage tendency의 최대 절대값을 경계값인 0.2로 가정하고 계산과정에서의 수치 에러(numerical error)를 고려할 때에, EXOS-B 모델이 가질 수 있는 실린더 부분

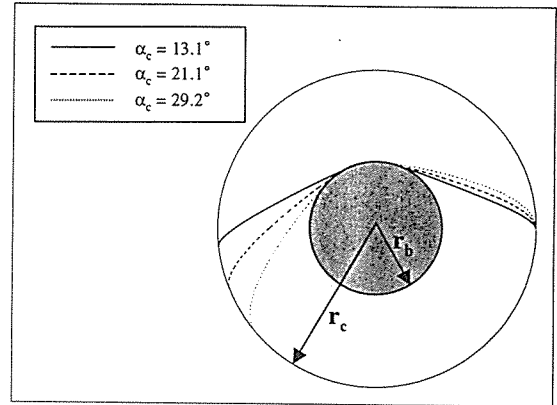


Fig. 7. Comparison of winding contour with various cylinder winding angles

와인딩 각도의 범위는 13.1°~29.2°가 된다. 실린더 부분 와인딩 각도의 값을 경계값인 13.1°와 29.2°, 중간 값인 21.1°로 두었을 때 첫 플라이와 마지막 플라이의 와인딩 각도 차이를 나타낸 그래프가 Fig. 6이다. Fig. 6으로부터 실린더 부분 와인딩 각도의 값이 클수록 와인딩 각도의 차이가 작아짐을 확인할 수 있다. 그렇지만, 이 결과만을 가지고 실린더 부분 와인딩 각도값의 변화가 압력탱크 거동에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 유추하는 것은 옳지 않다.

그 이유는 실린더 두께를 바꾸는 것은 플라이의 와인딩 패턴에는 영향을 미치지 않지만, 실린더 부분 와인딩 각도를 바꾼다는 것은 식 (1)의 semi-geodesic fiber path equation으로부터 알 수 있듯이 첫 플라이부터 와인딩 패턴 자체가 바뀐다는 것을 의미하기 때문이다. 이는 돔 전체의 와인딩 각도 변화를 비롯하여 돔 부분의 두께 변화를 의미한다. 이와 같은 돔 부분의 와인딩 패턴을 slippage tendency의 값에 따라서 비교하여 나타낸 그림이 Fig. 7이다.

3.4 반경비(r_b/r_c)의 영향

EXOS-B 모델의 반경비는 0.423이다. 이를 STEB의 전방돔과 후방돔의 형상 비율에 맞추어 각각 0.174와 0.376으로 두고 첫 플라이와 마지막 플라이의 와인딩 각도 차이를 비교한 그래프는 Fig. 8이고, 반경비가 클수록 첫 플라이와 마지막 플라이의 와인딩 각도 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

하지만, 반경비(r_b/r_c)도 앞절의 실린더 부분 와인딩 각도(α_c)와 같이 첫 플라이의 와인딩 패턴에 직접적인 영향을 미치는 설계 인자이기 때문에, 반경비에 대한

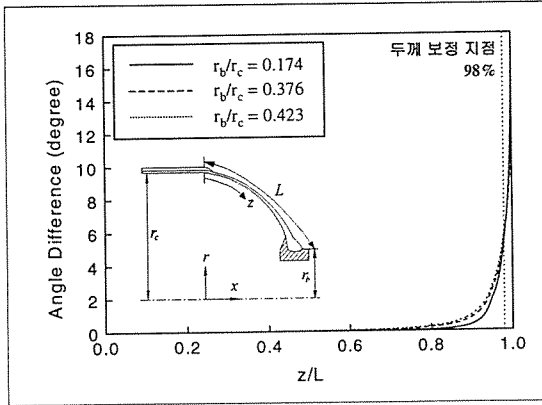


Fig. 8. Winding angle difference between first ply and last ply with various radius ratios

정확한 거동의 변화 분석은 해석을 통해서 수행 되어야한다.

4. 3차원 적층고체요소를 사용한 압력탱크의 비선형 해석

4.1 해석 모델과 방법

3차원 적층고체요소를 사용한 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 비선형 해석을 위해서 도입한 모델은 ASTEB(Advanced Standard Test Evaluation Bottle)이다. ASTEB을 선택한 이유는 실험데이터가 비교적 자세히 나와있어 해석결과와 비교가 가능하기 때문이다. 적용된 T800/Epoxy의 물성치는 Table. 2와 같다.

해석을 위한 유한요소모델링은 Fig. 9와 같다. 가장 응력에 취약한 보스 부분과 접속 부분을 제대로 묘사하기 위하여, 돔부분은 양방향 편중(two-way bias)방법으로 60개의 요소를, 실린더 부분은 일방향 편중(one-way bias) 방법으로 20개의 요소를 구성하였다.

압력탱크의 와인딩 패턴은 문헌[5]에 주어진 실험 데이터와의 비교를 위하여 동일하게 맞추었고, 실린더 부분의 와인딩 각도 27.5° 를 만족시키기 위하여 slip-page tendency값을 전방돔과 후방돔에 각각 $-0.103, 0.116$ 로 적용한 요소정보를 사용하였다.

경계조건은 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 축방향 대칭성을 이용하기 위하여 반복대칭(cyclic symmetric)조건을 이용하였으며, 보스 부분은 금속재 보스(metal boss)가 첨가된 경우와 같은 경계 조건을 묘사

Table 2. Material Property of T800/Epoxy

Symbol	Value
E_1	161.3 GPa
E_2, E_3	8.820 GPa
G_{12}, G_{13}	5.331 GPa
G_{23}	2.744 GPa
ν_{12}, ν_{13}	0.33
ν_{23}	0.45
X_t	2300 MPa
X_c	1080 MPa
Y_t	30 MPa
Y_c	70 MPa

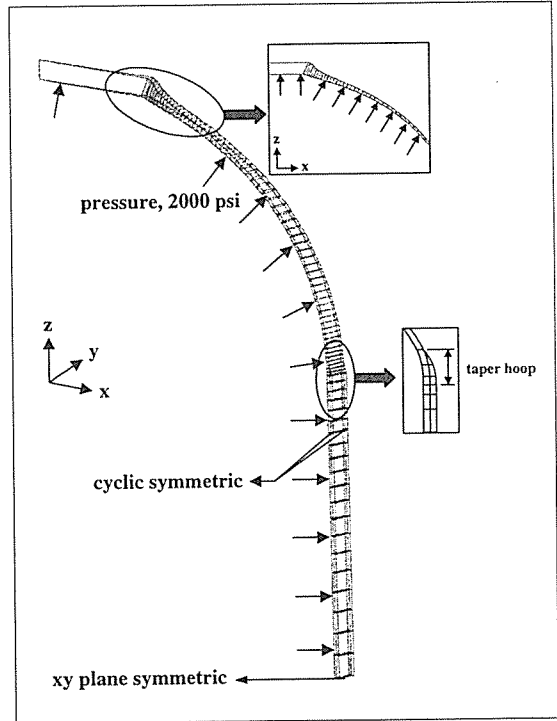


Fig. 9. Finite element model and boundary conditions

하기 위하여 ABAQUS의 *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

단이 발생된다. 즉, 압력탱크의 특성상 내압이 가해진 초기에는 구조물 전체에 인장이 발생되어 층간 파손/전단 파손형태보다는 수지 인장 파손이 지배적인 파손으로 나타나고, 최종적으로는 섬유 파손에 의해 구조물 파괴가 발생된다.[5] 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. 파손 이론으로는 점진적 파손해석을 위하여 파손 모드를 구분할 수 있는 최대응력 파손이론과 최대변형을 파손이론 중에서 실험에 의한 데이터가 주어져 있는[5] 최대응력 파손이론(maximum stress failure theory)을 사용하였으며, 층별 모재 파손후의 물성 저하률(degradation factor)은 0.1로 두었다.

4.2 해석 결과의 분석과 실험 데이터와의 비교

Fig. 10은 하중이 13.76 MPa 일때 재료의 비선형성을 고려한 해석과 기하학적 비선형(geometrically nonlinear)만을 고려한 해석의 압력탱크 윗면(top surface)의 섬유방향 변형률의 결과를 두개의 실험데이터[5]와 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 실험데이터와 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. 즉, 내압이 주어진 필라멘트 와인딩 된 압력탱크의 거동을 분석하고, 특히 파손압력을 예상하기 위한 해석에 있어서는 재료 비선형성을 고려해야 한다고 할 수 있다.

그런데, Fig. 10으로부터 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 것을 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 분

석할 수 있다. Fig. 11은 각각 13.76 MPa 의 하중을 받는 ASTEB의 변형을 다섯배의 비율로 확대하여 비교한 그림이다. 후방돔이 전방돔보다 반경비가 크기 때문에 같은 하중에 대해서 상대적으로 반경방향으로의 하중 성분이 크게 되고, 그에 따라서 반경방향으로의 접속부분에 걸리는 굽힘효과(bending effect)가 커지는 변형을 함을 볼 수 있다. 따라서, 접속 부분에 걸리는 응력 집중도 커진다고 분석된다. 접속 부분의 섬유방향 응력 차이의 또 다른 원인으로써 굽힘효과 이외에도 실린더 부분의 와인딩 각도의 영향을 생각해 볼 수 있다. ASTEB은 전·후방돔의 반경비가 다르기 때문에 와인딩의 안정성을 위해서는 각각의 와인딩 패턴이 달라야 한다. 그런데, 실험을 위해서 제작된 압력탱크는 실린더 부분의 와인딩 각도를 27.5°하여 제작한

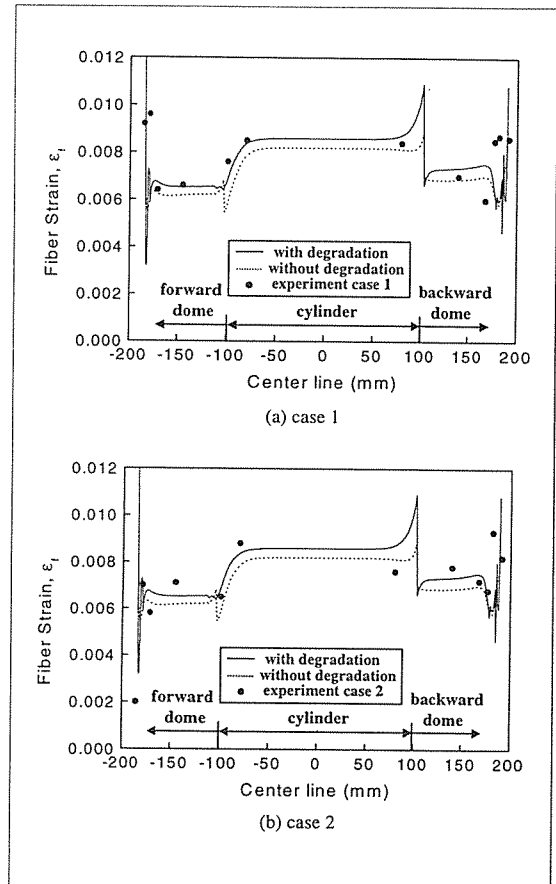


Fig. 10. Comparison of fiber strains between analysis and experiment of the ASTEB ($p = 13.76$ MPa)

모델이므로, 전방돔은 후방돔보다 반경비가 작기 때문에 전방돔의 형상만을 고려하였을때의 이상적인 패턴(geodesic path)의 실린더 와인딩 각도인 21.2° 보다 큰 와인딩 각도를 갖게 된다. 반면에, 후방돔은 이상적인 패턴(geodesic path)의 실린더 와인딩 각도인 33.9° (보다 작은 와인딩각도를 갖게 된다. 따라서, 후방돔은 전방돔에 비하여 접속 부분이 원주방향의 응력에 상대적으로 취약하게 되므로 응력집중이 발생한다고 할 수 있다.

Fig. 10에서 볼 수 있는 압력탱크 거동의 또 하나의 특징은 보스 부분에서 변형률이 급격히 증가하고 근처의 변형률 값들이 많은 변화를 보인다는 것이다. 그런데, 문헌[5]에서 주어진 실험결과로부터 보스 부분의 보강을 하지 않은 필라멘트 와인딩 된 압력탱크는 수압시험을 했을 때에 최종파손이 금속재 보스의 이탈에

의해서 일어남을 알 수 있다. 즉, 압력탱크와 완전 결합(perfect bonding)이 되어있지 않은 금속재 보스(metal boss)가 압력탱크 중심축 방향으로 내압을 받음으로 인해서 보스 끝 부분의 복합재 부분이 반경방향으로 들리는 거동을 보이게 되고, 결국 내압이 커지면서 복합재 부분이 견딜 수 있는 내압보다 상대적으로 훨씬 작은 압력에서 금속재 보스가 이탈하게 되는 것이다. 실제로 이러한 금속재 보스의 이탈을 막기 위하여 보스 부분은 웨이퍼(wafer)등의 보강을 하게 되고, 그에 따라서 최종 파손은 실린더와 돔 부분에서 일어나게 된다. 그런데, 보스 부분은 보강방법과 보스의 형상에 따라서 압력탱크마다 다른 특징을 보이기 때문에 보강후의 거동을 해석을 통해서 모사하는 것은 자세한 체결부 설계와 모델링을 필요로 한다.

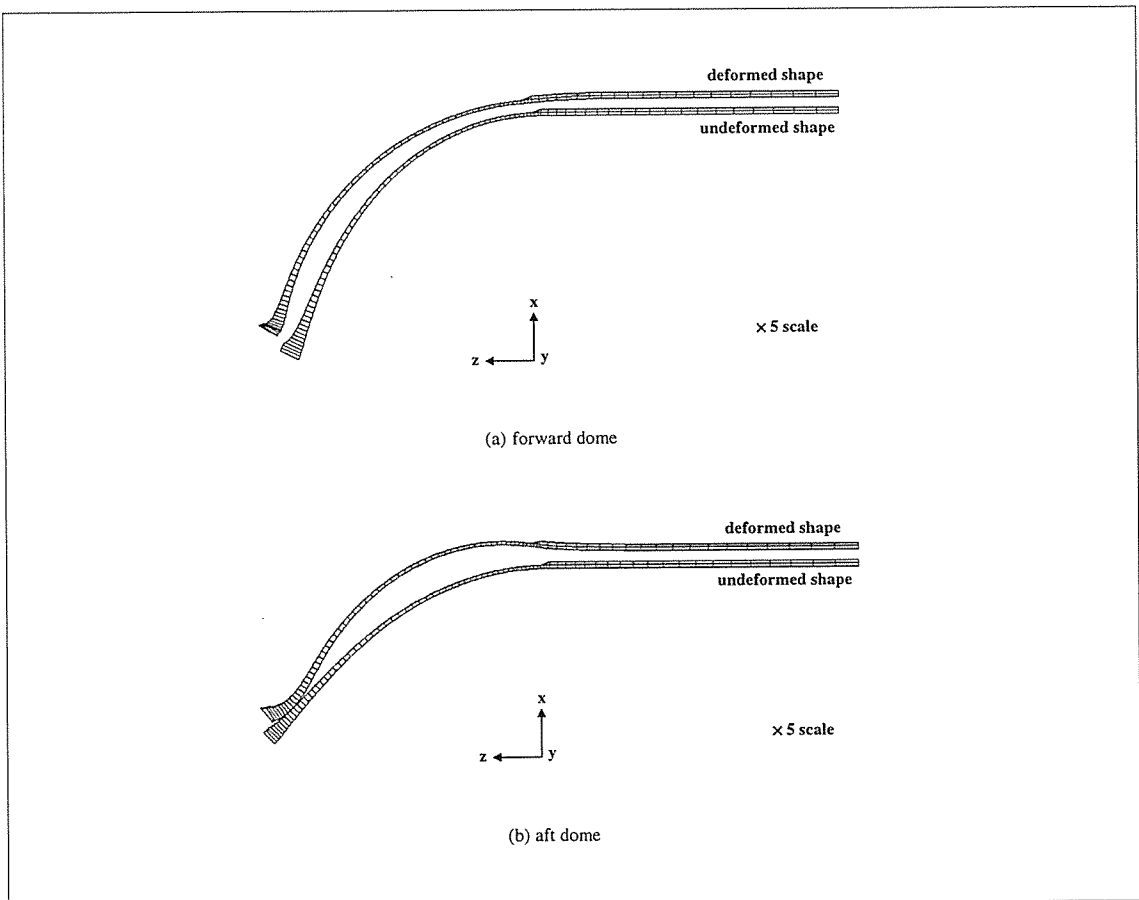


Fig. 11. Deformed shape of ASTEB ($p = 13.76 \text{ MPa}$)

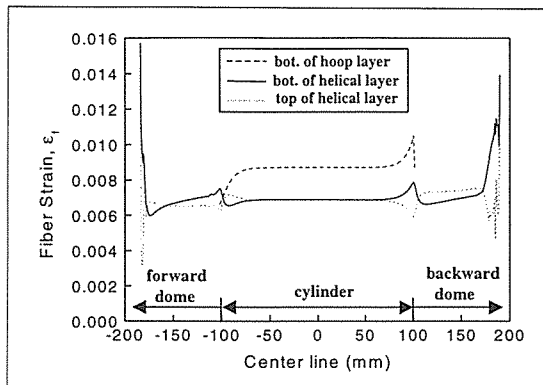


Fig. 12. Comparison of fiber strains of the ASTEB ($p = 13.76 \text{ MPa}$)

4.3 최종 파손 지점의 예측

필라멘트 와인딩 된 압력탱크는 거의 대부분의 하중을 섬유가 담당하기 때문에, 섬유의 파손은 곧 구조물 전체의 파손을 의미한다. 따라서, 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 Fig. 11의 압력탱크 개요로부터 압력탱크 전체의 바닥면, 헬리컬층의 윗면, 후프 와인딩층의 바닥면, 후프 와인딩층의 윗면 등 모두 네 지점이라고 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.

Fig. 12는 압력탱크의 바닥면과 헬리컬층의 윗면, 후프 와인딩 층의 바닥면에서의 섬유방향 변형률(fiber strain)을 비교한 그래프이다. 그런데, 압력탱크의 각 위치별로 섬유방향 변형률이 최대인 지점이 동일하지 않다. 전방돔에서는 거의 대부분의 위치에서 바닥면의 변형률이 헬리컬층 윗면의 변형률보다 크지만, 후방돔에서는 보스 부분을 제외하고는 헬리컬층 윗면의 변형률이 바닥면의 변형률보다 크고, 실린더 부분에서는 전체 구간에서 후프 와인딩층 바닥면의 변형률이 최대이다. 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.

5. 결 론

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, 재료의 비선형성을 고려한 유한요소해석을 3차원 적층고체요소를 사용하여 수행하였다. 본 연구의 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 헬리컬층의 두께가 두꺼울수록, 실린더의 와인딩 각도가 작을수록, 보스와 실린더의 반경비가 클수록 두께 방향의 와인딩 각도 변화가 커진다.
2. 재료의 비선형성을 고려한 해석이 기하학적 비선형성만을 고려한 해석보다 섬유 방향 응력을 전체적으로 높게 평가하며, 실험 결과와의 비교에서도 더 일치한다.
3. 압력탱크의 최종 파손은 헬리컬층의 바닥면, 헬리컬층의 윗면, 후프 와인딩 층의 바닥면의 세 지점에서 발생할 수 있으며, 파손 위치는 설계 변수의 값에 따라서 바뀌므로 해석을 통해서 예측할 수 있다.

6. 후 기

본 연구는 항공우주연구소(KARI)가 지원하는 연구 과제로 수행한 것이며, 지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Evans, "Composite Motor Case Design", *Design Methods in Solid Rocket Motors, Lectures Series*, No. 150, 1988, pp. 4.1-4.11
2. 홍창선 외, "섬유강화 복합재료의 개발과 응용 (FRP 압력용기의 개발)", 과학기술처 연구보고서, 1984
3. 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, 1995, pp.1278-1306,
4. M. Uemura, "CFRP 로켓 모터의 개발연구", 동경대학 우주항공연구소보고 제15권 제4호, 1979, pp.

821-863

5. 황태경 외, "필라멘트 와인딩 압력용기의 구조 설계 변수 해석을 통한 복합재 연소관의 성능 향상에 관한 연구", 제8차 유도무기학술대회논문집, 1998, pp. 329-339

6. J. M. Lifshitz, "Filament-wound pressure vessel with thick metal liner", *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 313-323

7. J. Scholliers and H. Van Brussel, "Computer-integrated filament winding: computer-integrated design, robotic filament winding and robotic qual-

ity control", *Composites Manufacturing*, Vol.5, No. 1, 1994, pp. 15-23

8. 주상건, "원공이 존재하는 필라멘트 와인딩 압력용기의 거동해석", KAIST, MAE Thesis, 1993

9. N. L. Newhouse and W. D. Humphrey, "Development of the Standard Test and Evaluation Bottle(STEB)", *SAMPE Journal*, March/April, 1986, pp. 12-15

10. M. Lossie and H. Van Brussel, "Design principles in filament winding", *Composites Manufacturing*, Vol. 5, No. 1, 1994, pp. 5-13