

외압을 받는 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 좌굴해석 Buckling Analysis of Filament Wound Composite Cylinders under External Pressure

*이우형¹, #조종래², 노민식¹, 권진희³, 조상래⁴

*W.H.Lee¹, #J.R.Cho(cjr@hhu.ac.kr)², M.S.Roh¹, J.H.Kweon³, S.R.Cho⁴

¹ 수중운동체특화연구센터, ² 한국해양대학교 기계정보공학부, ³ 경성대학교 항공기부품기술연구소, ⁴ 울산대학교 조선해양공학부

Key words : Buckling, Composite cylinder, Filament wound, Finite element analysis

1. 서론

제목 뒤에 심해에서 운항하는 잠수함은 외부의 높은 압축하중(pressure loads)을 받게 되므로 충분한 강도를 지니도록 내압선체(pressure hull)를 설계하여야 한다. 보통 잠수함이나 잠수정과 같은 내압선체는 보강 원통형 셸(stiffened cylindrical shell) 구조로 구성되고, 양 끝단에 구형 또는 타원 셸이 부착되는 형상을 지닌다. 셸은 선박, 잠수함, 항공기, 건축물의 돔 등에서와 같이 가장 흔하게 접할 수 있는 구조물이다. 따라서 지금까지 이러한 셸 구조물의 해석을 위한 수많은 연구가 이루어져 왔고, 이에 따른 다양한 셸 이론들이 제시되어 왔다. 특히 셸이 압축하중을 받을 경우 재료의 강도 보다 훨씬 낮은 응력에서 좌굴이 발생하게 되어 구조적으로 큰 문제를 일으킬 수 있으므로 셸의 압축 좌굴과 관련된 연구는 최근까지도 계속되고 있다.

지금까지의 셸 좌굴에 대한 연구는 주로 횡하중이나 압축하중 중 하나만을 받는 경우에 대한 연구였다. 그러나 실제 잠수함의 경우 굽힘 모멘트로 인한 압축 혹은 인장하중을 받을 뿐만 아니라 수압하중을 동시에 받게 된다. 이미 잘 알려진 바와 같이 셸에 수압하중이 작용할 경우 압축 좌굴응력은 크게 달라질 수 있으므로 정확한 좌굴하중 계산을 위해서는 수압하중을 고려한 해석이 필요하게 된다.

본 연구에서는 필라멘트 와인딩(filament winding) 복합재 원통을 제작하여 좌굴해석을 수행하였다. 이론적인 복합재 원통의 허용압력식과 유한요소해석 및 수압시험을 비교하였다.

2. 복합재 원통의 좌굴압력 해석식

2.1 ASME code 2007 version(RD-1172)

외압을 받는 복합재 원통의 허용압력은 식(1)에 의해 결정된다.[3]

$$P_a = \frac{KD0.8531\gamma E_{hf}^{3/4} E_{at}^{1/4} t^{5/2}}{(1-\nu_x \nu_y)^{3/4} L \left(\frac{D_0}{2}\right)^{3/2} F} \quad (1)$$

2.2 NASA SP-8007

NASA 에서 제안하는 복합재 원통의 좌굴압력은 식(2)와 같이 계산된다.[4]

$$P_a = \frac{R}{FS \left[n^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{m\pi R}{L} \right)^2 \right]} \frac{\det \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}} \quad (2)$$

$$C_{11} = A_{11} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + A_{66} \left(\frac{n}{R} \right)^2$$

$$C_{22} = A_{22} \left(\frac{n}{R} \right)^2 + A_{66} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2$$

$$C_{33} = D_{11} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \left(\frac{n}{R} \right) + D_{22} \left(\frac{n}{R} \right)^4 + \frac{A_{22}}{R^2} + \frac{2B_{22}}{R} \left(\frac{n}{R} \right)^2 + \frac{2B_{12}}{R} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2$$

$$C_{13} = \frac{A_{12}}{R} \left(\frac{m\pi}{L} \right) + B_{11} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^3 + (B_{12} + 2B_{66}) \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \left(\frac{n}{R} \right)^2$$

$$C_{31} = C_{13}$$

$$C_{12} = (A_{12} + A_{66}) \left(\frac{m\pi}{L} \right) \left(\frac{n}{R} \right)$$

$$C_{21} = C_{12}$$

$$C_{23} = (B_{12} + 2B_{66}) \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \left(\frac{n}{R} \right) + \frac{A_{22}}{R} \left(\frac{n}{R} \right) + B_{22} \left(\frac{n}{R} \right)^3$$

$$C_{32} = C_{23}$$

여기서, A,B,D=traditional ABD Matrix

m,n=integers varied to obtain the combination that gives the lowest buckling pressure

$$R = D_0/2$$

3. 복합재 원통의 수압시험

본 연구에 사용된 시편은 T700 탄소섬유를 필라멘트 와인딩 기법으로 제작하였다. Fig. 1 과 같이 두께 8mm, 내경 300mm, 길이 695mm 로 제작하였고, 섬유각(winding angle)은 [±30/90]FW, [±45/90]FW, [±60/90]FW 이다. 여기서 ±30, ±45, ±60 로 표시된 부분은 헬리컬 와인딩(helical winding) 층의 각도이고, 뒤에 90 은 후프 와인딩(hoop winding) 층의 각도이다. 헬리컬 와인딩에 후프 와인딩으로 보강한 경우 전체 두께 8mm 의 10%인 0.8mm 를 후프 와인딩층으로 하였다.

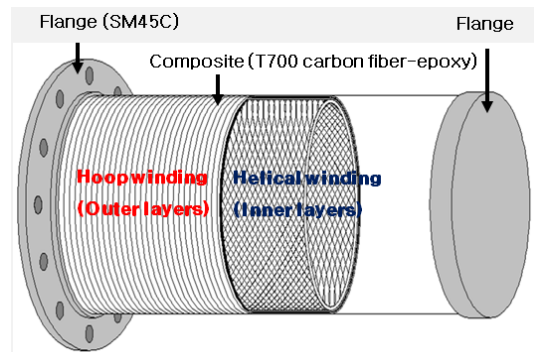


Fig.1 Schematic of a filament wound composite cylinder with flange

Fig.2 는 수압장치의 개념도이다. 수압 시험 중의 압력과 변형 정보는 컴퓨터 인터페이스 시스템을 이용하여 수집하도록 구성되어 있다. 호스에서 수압용기로 수압을 가하면서 이때의 압력과 변형률을 디지털 압력 측정기, 변형률 게이지 및 LVDT 를 사용하여 측정하였다.

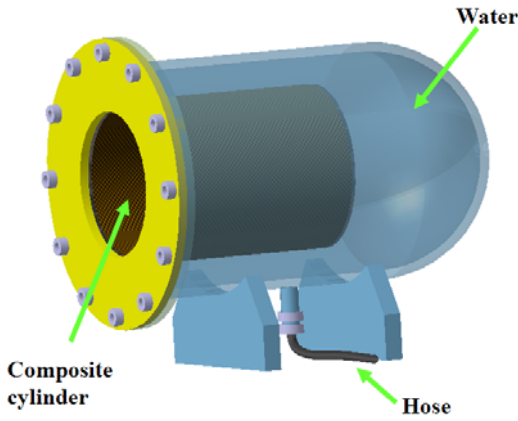


Fig.2 Schematic of applying hydrostatic pressure

4. 유한요소해석을 통한좌굴해석

유한요소 좌굴해석에서는 복합재 원통을 쉘 요소로 모델링 하였고, 구속조건은 원통의 좌측 부분인 플랜지 부분은 고정지지로 하였고, 우측의 캡 부분은 축방향 변위만을 허용함으로써, 실제 수압 시험과 유사하게 구현하였다. 해석에 사용된 요소는 SHELL181 이고, 요소의 수는 약 34,000 개이다.

5. 결과 및 고찰

유한요소해석을 통하여 필라멘트 와인딩 적층 각도[±0]FW ~[±90]FW 를 기준으로 좌굴해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과와 NASA 및 ASME 2004&2007 code 을 비교하였다. 해석모델은 R=1000 mm, L=1500 mm, t=30mm 이다. 그 결과는 Fig.3 과 같다. NASA 식이 유한요소해석값에 가장 많이 근접하였고, ASME 2004 code 는 [±45]FW 을 기준으로 대칭으로 나타났다. ASME 2004 code 식은 적층각도 [±45]FW 이하에서의 적층각 영향을 고려하지 못하는 것으로 판단된다.

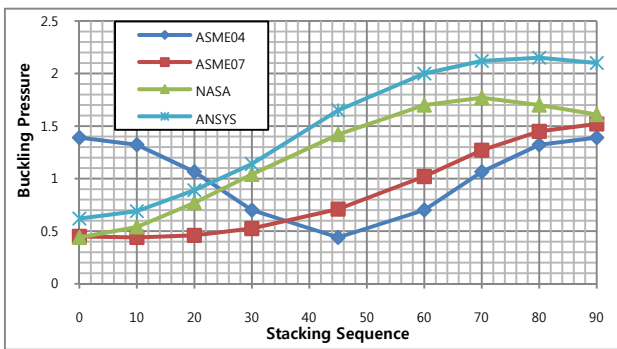


Fig.3 Buckling Pressure for Stacking Sequence

수압 시험에서의 좌굴압력은 원통에서 파손이 발생하기 직전에 ‘뽕’하는 소리와 함께 대변형이 일어나는데, 이때의 수압을 좌굴압력으로 정의하였다. Fig.4 는 ASME 와 NASA 에서 제안한 허용압력과 유한요소해석 및 수압 시험의 좌굴압력을 나타낸다. (단, 안전율 F=1)

6mm 원통인 경우에 수압시험의 좌굴압력은 3.2MPa 이고, 유한요소해석에서의 좌굴압력은 2.79MPa 으로 약 13%의 차이를 보이고 있다. NASA 와 ASME 이론식에 의한 좌굴압력은 각각 2.97MPa, 1.615MPa 로 계산되었다. 10mm 원통인 경우의 수압시험 결과는 11.8MPa, 유한요소해석은 12.66MPa 으로 약 7%의 차이로 나타났다. NASA 와 ASME 이론식에 의한 좌굴압력은 각각 10.34MPa, 5.4MPa 로 계산되었다. Fig.5 는 수압 시험에서 최종파손 양상을 나타낸다.

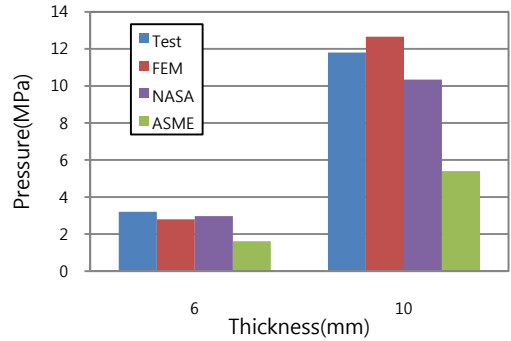


Fig.4 Comparison of Buckling Pressure

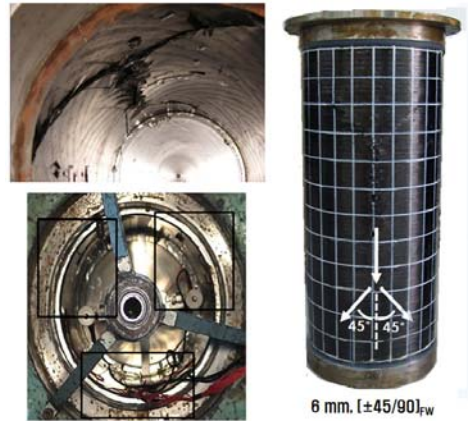


Fig.5 Failure of composite cylinder

6. 결론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 복합재 원통 쉘의 좌굴해석을 수행하였고, 실제 수압 시험과 유한요소해석 및 이론식의 좌굴압력을 비교한 결과 얻은 결과는 다음과 같다.

NASA SP-8007 과 ASME 2004&2007 code 에서 제안된 복합재 허용압력식을 이용하여 필라멘트 와인딩 복합재에 대한 좌굴압력을 계산하였다. NASA 식이 수압시험 결과에 가장 근접하였고, ASME 2004 식은 적층각에 따른 영향을 고려하지 못하는 것으로 나타났다. 필라멘트 와인딩 복합재의 유한요소해석 결과를 검증하기 위해 복합재 원통을 제작하여 수압 시험을 수행하였다. 오차는 7~13% 로 나타났다.

후기

본 연구는 수중운동체특화연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. 문철진, 허성화, 안정희, 권진희, 최진호, 조종래, 조상래, “외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 후판 복합재 원통의 좌굴 연구”, 한국우주항공학회지, 제 37 권, 2009, pp147-155
2. 정태환, 이종무, 홍석원, 김진봉, 안진우, “복합재 반자율 무인잠수정(SAUV)의 내압선체 설계, 구조해석 및 내압 시험 결과에 관한 검토”, 한국해양공학회지, 제 18 권 2004, pp.52-58
3. 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, SECTION X, pp.35
4. NASA SPACE VEHICLE DESIGN CRITERIA, “Buckling of Thin-walled Circular Cylinders”, NASA SP-8007 Solution, 1968