

고심도 복합재 원통셸의 수치해석적 연구 방법

조종래 (한국해양대학교), 정해영 (LG전자)

1. 서론

심해에서 운항하는 잠수함은 외부의 높은 압축하중을 받게 되므로 충분한 강도를 지니도록 내압선체(pressure hull)를 설계하여야 한다. 국내에서도 최근 HY80 또는 HY100 등의 고강도강으로 건조한 실적이 있다. 고강도강으로 건조하는 현대식 디젤-전기 추진식 잠수함인 SSK의 경우 선각 중량이 전체 중량의 43%를 차지하고, 원자력 추진 공격용 잠수함인 SSN의 경우는 선각 중량이 전체의 45%를 차지하고 있다. 이러한 중량 민감 구조물 (weight sensitive structure)은 자체 중량을 줄임으로써 구조물 성능의 현저한 향상을 기대할 수 있는데 그 중 우선적으로 생각 해 볼 수 있는 방법이 복합재와 같은 저비중량 재료의 채택이다. 복합재로 내압구조물을 건조하면 복잡한 형상의 성형이 용이하고, 부식에 대한 저항성이 뛰어나다는 것 외에 재료의 방향별 강도와 강성을 설계자가 직접 결정할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 또한 복합재는 전파를 투과시키기 때문에 전파탐지비(stealth) 성능이 필요한 군사 구조물에 장점이 되고 있다. 이런 이유로 프랑스해군의 Rubis, Amethyste급 잠수함은 고강도강으로 건조되었고 소나 돔(sonar dome)과 커닝타워(conning tower)는 복합재로 만들어졌다. 현재는 수중운동체에 복합재료의 적용이 보조구조물을 넘어 주구조물로 확대되고 있다. 하지만 이러한 적용에 관한 연구 결과는 일부 공개는 되고 있으나 군사구조물에 대한 연구 내용으로 대부분 공개되지 않고 있어 국내에서 선진국의 연구 결과를 이용하는 것이 어려운 실정이다.

심해에서 운항하는 수중운동체가 받는 하중은 외부 압력에 의한 수압이라고 할 수 있다. 두께에 비해서 반경이나 길이가 큰 구조물을 셸 구조물이라고 부른다. 이 구조물이 정수압과 같은 외압을 받을 경우 재료가 지니는 고유한 강성보다 훨씬 낮은 압력에서 좌굴이 발생하게 되어 구조적으로 치명적인 문제를 일으킬 수 있으므로 원통 셸구조물의 압축 좌굴과 관련된 연구는 최근까지도 계속되고 있다. 원통셸 구조물에서 좌굴이 발생할 때 지지하중이 급격히 감소하는 불안정좌굴을 보이기 때문에 이들 구조물에서 좌굴은 가장 중요한 요소가 되고 있다. 그리고 좌굴이 발생하기 전에 파손이 발생하는 경우도 있기 때문에 좌굴하중과 파손하중을 동시에 고려한 설계가 필요하다. 따라서 후판 복합재에 대한 변형특성 및 파손에 대

한 연구가 많이 필요하다. 일반적으로 원통셸에서 좌굴하중이나 좌굴 후 하중지지도를 향상시키기 위하여 취할 수 있는 방법으로는 경계조건이나 곡률반경을 변경하거나 재료 자체를 다른 것으로 대체하는 방법 등이 있다. 수지(resin)에 섬유(fiber)를 함침시킨 섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite material)로 만들어진 원통셸에서는 보강섬유의 방향(fiber orientation)이나 적층순서의 변화에 의해서 구조물의 유효강성(effective modulus)이나 강도를 변화시킬 수 있다. 따라서 적절한 적층의 선택에 의해 좌굴에 대한 구조물의 저항능력을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 필요에 알맞은 특성을 갖도록 최적의 설계를 할 수 있게 된다.

또한 설계 단계에서 선체의 재질이 등방성 고강도강일 때 내압선체 구조의 강도추정을 위한 해석적인 방법들은 내압선체의 좌굴모드별로 적합하게 개발된 해석 식(analytic formula)을 사용하거나 유한요소법을 이용한 수치적인 해석방법으로 내압선체의 전체 구조부재를 유한요소 모델링을 통해 좌굴모드와 강도를 구하고 있다. 본 논문에서는 고심도 해양 환경에서 좌굴을 예측하는 유한요소법 및 설계식에 의한 방법을 소개하고자 한다.

2. 유한요소 해석법

2.1 선형좌굴해석 좌굴 이론

일반적인 구조물의 선형 유한요소방정식은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$[K]\{u\} = \{F\} \tag{1}$$

여기서, $[K]$ 는 강성행렬로서 구조물에 적용하는 기계적 물성치가 주어지면 적용되는 값이고, $\{F\}$ 또한 외부하중벡터로서 이미 주어진 값이다. 따라서 적절한 수치기법을 사용하여 연립방정식을 풀면 절점변위벡터 $\{u\}$ 를 계산할 수 있다. 그러나 좌굴 문제의 경우 구하고자 하는 대상이 좌굴하중이므로 외부하중벡터 $\{F\}$ 의 값이 미리 결정되지 않는다. 물론 절점변위벡터 $\{u\}$ 도 미지수이다. 즉, 하중과 변위 모두 미지수인 경우이다. 따라서 일반적인 정적문제와는 다르게 취

급해야 한다. 따라서 식(1)의 외부하중벡터 $\{F\}$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{F\} = \lambda [K_G] \{u\} \quad (2)$$

여기서 λ 는 결정되어야 할 미지수이고, $[K_G]$ 는 미분강성행렬(differential stiffness matrix) 혹은 기하학적 강성행렬(geometric stiffness matrix)이라고 하는 행렬이다. $\{u\}$ 는 여전히 미지수로 남아있는 절점변위벡터이다. 만약 미분강성행렬 $[K_G]$ 를 알 수 있다고 가정하고, 식 (1)을 식(2)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$([F] - \lambda [K_G])\{u\} = 0 \quad (3)$$

식(4)는 우리가 잘 알고 있는 바와 같이 λ 를 고유치(eigenvalue)로 하고 $\{u\}$ 를 고유벡터(eigen vector)로 하는 고유치 문제이다. 이제 남아 있는 문제는 식(3)의 미분강성행렬 $[K_G]$ 를 구하는 방법으로 귀결된다.

선형좌굴해석을 수행하기 위해서는 두 번의 해석을 필요로 한다. 그 첫 번째 해석은 단순 선형정적해석이며 이는 바로 식(3)의 미분강성행렬 $[K_G]$ 를 구하기 위한 과정이다. 이 같은 예비해석에 의해 구조물의 미분강성행렬이 결정되면 식 (3)의 고유치 문제가 완성된다. 그러면 2단계로 고유치 문제를 풀어서 그 결과로 고유치와 고유벡터를 얻게 된다. 계산된 고유치에 예비하중을 곱하면 그 값이 바로 좌굴하중이 된다. 또한 계산된 고유치에 해당하는 고유벡터는 좌굴모드가 된다.

2.2 선형 좌굴 해석

비선형 좌굴해석시 좌굴의 형태는 여러 가지로 발생하게 된다. 이러한 좌굴행태를 모드별로 알 수 있게 해주는 해석이 선형(고유치) 해석인 것이다.

이러한 선형 해석에 의한 모드값은 좌굴과 관련지어 말하면 선형좌굴계수가 된다. 즉 $1MPa$ 의 압력을 원통셀의 표면에 적용하여 고유치 해석을 수행한 결과 모드값이 100이 나왔다면 이 모드값은 선형좌굴계수가 되며, 주어진 압력 $1MPa$ 을 모드값에 곱하면 선형좌굴압력이 된다. 하지만 이러한 선형좌굴계수는 원통셀의 형상과 관련되어 나타나므로 처음에 $1MPa$ 대신에 $0.5MPa$ 을 주게 되면 선형좌굴계수는 200이 나오게 되어 선형좌굴압력은 처음과 같이 $10MPa$ 으로 같게 되는 것이다. 따라서 이러한 고유치 해석시 주어지는 하중은 기본적으로 1로 주어지게 된다.

그리고 고유치 해석은 원하는 모드의 수를 조절하여 나타낼 수 있다. 하지만 이러한 모드가 증가될수록 선형좌굴계수는 증가하게 된다. 즉 첫 번째 모드의 선형좌굴계수가 가장 작고 이 때의 선형좌굴계수에 의한 선형좌굴압력이 가장 작을 것이다.

발생되는 좌굴의 형태는 다양하지만 가장 작은 좌굴압력을 나타내는 첫 번째 모드에 대한 고유치 해석만을 수행하여 비교한다.

2.3 비선형 좌굴 해석

선형좌굴 해석만으로는 좌굴을 정확하게 예측할 수는 없다. 그리고 실제 제작되는 내압선체는 제작시의 오류로 인한 원형 일탈(out-of-roundness)이나 잔류응력 등의 초기 결함(initial imperfection)을 지니고 있으며, 수중운동체의 운행 시에 높은 압축하중이 내압선체에 작용하면 구조부재의 변형으로 인한 기하학적 비선형 및 선체 재료의 비선형이 나타날 수 있다. 이런 이유로 선형좌굴해석뿐만 아니라 비선형 좌굴해석도 해주어야 한다.

유한요소법을 이용하여 좌굴에 민감한 구조물의 비선형좌굴해석을 수행하는 방법으로는 비선형 후좌굴해석법과 초기결함법을 들 수 있는데 비선형 후좌굴해석법은 초기형상결함의 영향을 정량적으로 파악하기 어려울 뿐만 아니라 대부분의 상용 소프트웨어들이 이 방법을 지원하고 있지 않는데 반해 초기결함법은 그 자체가 초기결함을 포함시키는 방법인데다가 선형 탄성좌굴해석과 비선형 응력해석을 지원하는 모든 유한요소 해석프로그램의 활용으로 해결가능한 방법이기 때문에 대부분 이 방법을 사용하고 있다.

이것은 선형 좌굴모드와 같은 형상의 미소한 변형을 초기 조건으로 부여하고 이에 대한 비선형 구조해석을 수행하여 하중-변위 관계를 구한 뒤, 하중이 도달할 수 있는 최대값을 찾는 방법으로 하중-변위 관계를 구하기 위한 비선형 해석법으로는 하중증분법, 변위증분법, 리क्स방법(Riks method) 등이 있는데 이들 특징을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- (1)하중증분법 : 최고하중점까지는 하중-변위 관계를 구할 수 있으나 그 이후의 거동인 제하경로(unloading path)를 찾지 못하는 것이 단점이다.
- (2)변위증분법 : 최종강도 이후의 거동까지도 찾아낼 수 있으나 모든 변위 성분들이 일정 비율로 증가하지 않는 원통과 같은 복잡한 구조에는 적용할 수 없는 것이 문제이다.
- (3)리क्स 방법(Riks method) : 하중과 변위를 동시에 미지수로 보고 호길이(arc length)라고 하는 새로운 파라미터

(parameter)를 도입해 하중-변위 곡선을 추적해 가는 방법으로 최종강도 이후의 거동인 제하경로까지 찾을 수 있으나, 하중성분들 사이에 비례관계가 유지되는 문제에만 적용 가능하다.

2.4 유한요소해석 및 좌굴 설계식의 적용

실제 유한요소 해석 및 설계식에 의한 해석을 수행하고 이를 분석하여 좌굴해석에 대한 이해를 돕고자 한다. 외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 복합재의 좌굴 압력을 예측하기 위해서, 유한요소해석, 좌굴 압력식(ASME 2007, NASA SP-8007)을 사용하였다. 필라멘트 와인딩 적층각도는 $[\pm 30/90]$ 에 대해서 적용하였으며 유한요소해석, 좌굴압력식(ASME 2007, NASA SP-8007)을 이용하여 해석을 수행하였다. 유한요소해석에서는 등가물성치와 적층물성치를 사용하였으며, 좌굴압력식에서는 등가물성치를 사용하였다.

2.4.1 좌굴 압력식(ASME 2007)에 의한 좌굴압력

ASME 2007에서 좌굴 압력값은 다음과 같이 정의 된다.

$$P_a = \frac{KD \cdot 0.8531 \cdot \gamma \cdot E_{hf}^{3/4} \cdot E_{at}^{1/4} \cdot t^{5/2}}{(1 - \nu_x \cdot \nu_y)^{3/4} \cdot L \cdot \left(\frac{D_0}{2}\right)^{3/2} \cdot F} \quad (4)$$

좌굴 압력식에 대한 검증을 위하여 적층각을 $[\pm 30/90]$ 에 대해서 좌굴 압력값을 계산하였다. 좌굴압력 계산에 사용된 복합재 원통형 셀의 치수를 표 1에 나타내었다. 이 경우의 좌굴압력 $P_{cr} = 2.29 \text{ MPa}$ 으로 계산되었다.

표 1. 예제에 사용될 형상 치수정보

	Value
Diameter(mm)	686.0
Length(mm)	159.5
Thickness(mm)	8.0
Angle	$[\pm 20/90]_{FW}$ to $[\pm 70/90]_{FW}$

2.4.2 좌굴 압력식(NASA SP-8007)에 의한 좌굴압력

NASA SP-8007에서는 원통형 셀의 좌굴압력식을 다음과 같이 사용하고 있다. 계산된 좌굴압력식 $P_{cr} = 3.11 \text{ MPa}$ 이다.

$$P_a = \frac{R}{F[n^2 + \frac{1}{2}(\frac{m\pi R}{L})^2]} \frac{\det \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}} \quad (5)$$

2.4.3 유한요소해석을 이용한 좌굴압력

사용된 좌굴 해석법은 선형 좌굴 해석과 비선형 좌굴 해석 기법을 사용하였다. 선형 좌굴은 고유치 해석을 수행하여 첫 번째 모드의 고유치를 좌굴압력으로 사용한다. 비선형 좌굴 해석은 초기 결함법과 리스법을 사용한다. 비선형 해석은 선형 좌굴의 첫 번째 모드의 미소 변형을 초기조건으로 부여하여 수행 한다.

유한 요소 해석은 좌굴설계식과 같은 치수를 적용하여 $[\pm 30/90]$ 에 대해서 수행하였다. 이 해석은 선형 좌굴 해석 및 비선형 좌굴 해석을 수행 하였다. 이것은 실험값 및 좌굴 압력식과 비교하기 위해서 이다. 선형 좌굴 해석은 각 적층의 두께에 표 2의 물성치를 부여한 좌굴 압력과 이 재료 물성치를 등가로 부여한 두가지 경우를 수행하였다. 이 결과를 좌굴 압력식과 비교 한다.

표 2. 정수압 실험 시편 형상 정보

Model	Radius (mm)	Height (mm)	Thickness (mm)	Hoop thickness (mm)
FW 30/90-1	159.5	686	8.0	1.4
FW 30/90-2	159.8	687	8.0	1.4
FW 30/90-3	159.2	687	8.0	1.6
FW 30/90-4	159.2	687	8.0	1.5

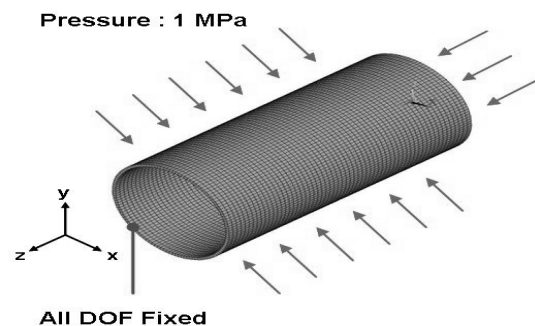


그림 1. 원통셀의 경계조건

원통형 셀의 제작에 사용된 복합재 재료물성치는 탄소섬유 T700을 사용하였다. 좌굴 압력식에 사용된 재료 물성치는

MSC.Patran을 이용하여 등가물성치를 계산하여 사용하였다. 후판 복합재 원통형 셀의 유한요소 좌굴해석을 수행하기 위해 상용 코드인 ANSYS 11(Classic)을 사용하였다. 비선형성과 복합재 물성치 적용이 가능한 셀 요소(Shell181)를 사용하였다. 실험값과 비교하기 위하여 비선형 및 선형 좌굴 해석을 수행하였다. 표 2 에 실제 수압실험에 사용된 원통형 셀의 치수 값을 나타내었으며, 유한요소해석에서는 평균치를 적용하여 유한요소모델을 생성하였다.

유한요소애 사용된 변위 경계조건은 플랜지 부분은 완전 고정 지지로 가정하고, 막혀있는 형상의 캡 부분은 축방향 변위를 허용함으로써 실제 시험과 유사하게 구현하였다. 그리고 하중 경계 조건은 좌굴 해석을 위해 단위하중인 1[MPa]의 압력을 주었다. 그림 1은 유한요소 해석에 적용한 경계조건을 나타내었다.

3. 복합재 제작 및 시험

3.1 필라멘트 와인딩 공정

필라멘트 와인딩 공정은 그림 2, 3과 같이 섬유로 이루어진 안(yarn)이나 토우(tow)에 수지를 함침 시킨 후, 제품을 성형 시키기 위해 미리 준비한 맨드렐(mandrel)을 회전시켜서 회전하는 맨드렐 주위에 일정하게 감은 후 경화시키는 공정이다.

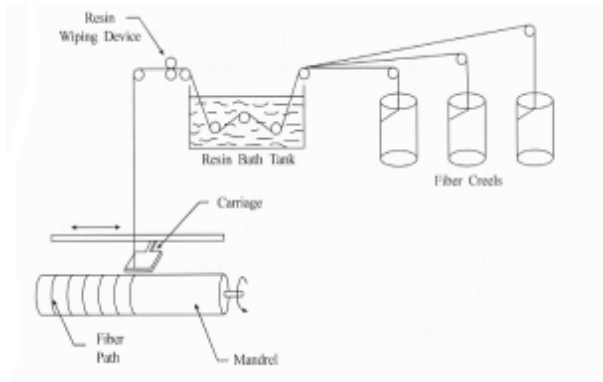


그림 2. 필라멘트 와인딩 공정 개념도

경화가 끝난 필라멘트 와인딩 제품 내부의 맨드렐은 일반적으로 제거하지만, 제거하기가 어려운 경우에는 복합재료의 내부에 그냥 남겨 놓은 경우도 있다. 필라멘트 와인딩 공정으로 얻을 수 있는 제품의 모양은 비교적 단순하며, 파이프나 항공기의 동체 혹은 자동차의 프레임등과 같은 것이 예이다. 다른 복합재료 가공법에 비하여 사용되는 재료의 가격이 저렴하고 인건비가 적게 들며 제품의 복제성이 좋다는 장점이 있다. 특

히 원통형의 압력용기를 복합재료로 제작할 경우 가장 적합한 공정으로 볼 수 있다. 로켓의 연소관, 각종 연료탱크, 압력용기 등의 제작에 많이 사용되고 있다. 하지만 맨드렐의 제거가 어렵고 오목한 면의 제조가 불가능한 문제점이 있다.



그림 3. 필라멘트 와인딩 공정

3.2 시험 장치 및 방법

시험에서 사용한 장비의 개념도를 그림 4에 보였다. 한쪽 끝이 열린 형태의 것이기 때문에 수압의 증가에 따른 구조물의 변형을 원통의 내부에서 육안으로 관찰 할 수 있다. 복합재 원통이 수압용기의 문에 부착되고 호스를 통해 물이 공급되어 복합재 원통에 수압을 가하게 된다. 수압 시험 중의 압력과 변형 정보는 컴퓨터 인터페이스 시스템을 이용하여 수집하도록 구성된다. 시험 장치는 수심 1500 m에 해당하는 150 기압을 견딜 수 있으며, 최대 시험모델의 크기는 600 mm(D)×1500 mm(L)이다.

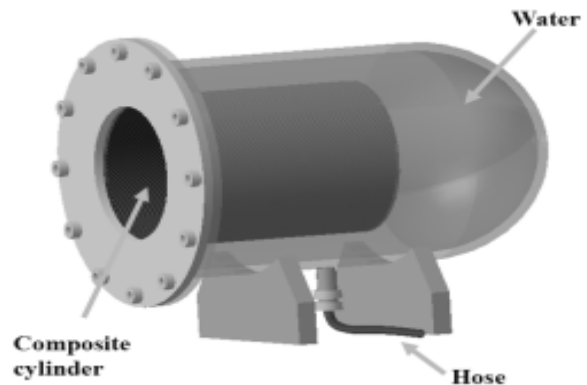


그림 4. 정수압 시험 장치 개념도

수압시험을 수행하기 전에 시험편의 원주방향으로 90° 간격을 가지고, 네 위치에 직각으로 각각 2개의 변형률 게이지를

부착하여 수압에 따른 변형률을 측정한다(그림 5). 그림 6은 파손의 정도를 가시적으로 표현하기 위하여 표면에 원주방향과 길이방향으로 그리드를 그렸다. 원통은 수압시험 장치의 도어에 오링(o-ring)을 이용하여 수압시험 장치에 장착하였다. 수압시험장치의 압력은 허용압력 40 MPa의 자동펌프를 이용해 가한다.

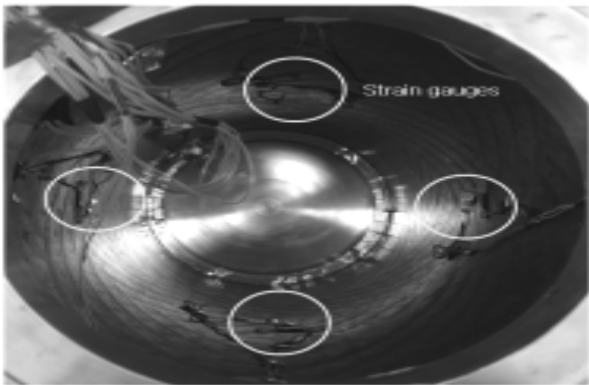


그림 5. 스트레인 게이지가 부착된 원통셀

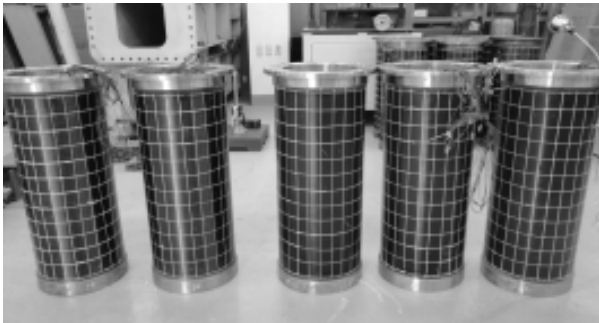


그림 6. 제작된 원통셀

4. 결론

유한요소해석과 좌굴압력식을 이용하여, 외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 원통셀의 좌굴압력 및 거동을 파악하기 위한 효과적인 좌굴해석방법을 소개하였다.

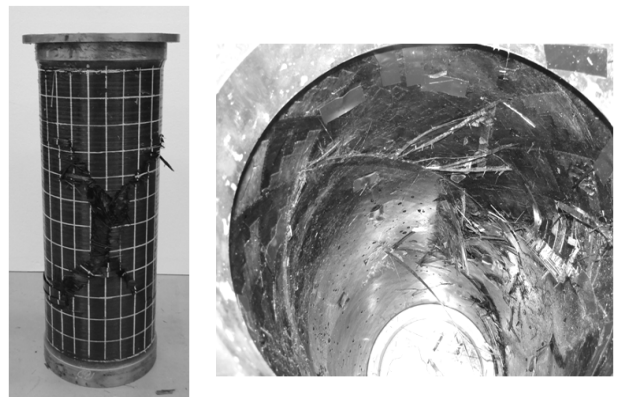
실제 정수압 하중하의 좌굴압력을 예측하기 위하여 사용하는 방법은 선형의 방법을 주로 사용한다. 그러나 선형좌굴해석방법은 후좌굴의 거동은 예측할 수는 없다. 이러한 단점을 보강하기 위하여 비선형 좌굴해석을 많이 수행하고 있으며 비선형 좌굴해석을 수행하기 위해서는 앞서 소개했었던 형상 불안전형등의 요소는 수압검증실험을 거쳐서 합리적인 가정이

필요하다. 또한 복합재의 특성은 파손이 일어나면 일반적인 스틸 재료에 비하여 급격히 파손이 일어나는 경향이 있기 때문에 복합재 파손을 고려한 물성치 모델의 적용이 필요하다.

실제 비선형 해석에서 점진적 파손기법과 호길기법을 적용한 유한요소해석 결과와 실험의 파손 양상은 유사하며 좌굴 압력은 5% 이내로 일치한다. 그림 7은 비선형 유한요소해석의 결과 선형해석결과, 실험의결과를 비교하였다. 좌굴 초기에는 선형 좌굴과 같은 거동은 보이나 좌굴이 진행 후 파손이 일어나는 시점에서는 파손의 불균형으로 한쪽만 급격히 파손이 일어나는 것을 알 수 있다.

	Position ①	Position ②	Position ③
SDV1			
SDV2			

(a) 비선형 좌굴 해석



(b) 수압실험의 파손 양상

그림 7. 파손이 일어난 후의 원통셀

후기

본 기고문은 국방부 산하 방위산업청 지정 수중운동체특화 연구센터(Underwater Vehicle Research Center)의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

Hae-Young Jung, Jong-Rae Cho, Jeong-Young Han, Woo-Young Lee, Won-Byong Bae and Yun-Sik Cho, The Study on buckling of filament-wound cylindrical shells under hydrostatic external pressure using finite element analysis and buckling formula, Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 5, pp. 731-738, 2012.

정해영, 조종래, 배원병, 이우형, 수치해석적 기법을 이용한 복합재 원통 셸의 좌굴 연구, 대한기계학회논문집 A권, 제 36권 제1호, pp. 51-58, 2012.

Myung-Hun Kim, Jong-Rae Cho, Won-Byong Bae, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Sang-Rae Cho and Yun-Sik Cho, Buckling analysis of filament-wound thick composite cylinder under hydrostatic pressure, Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 6, pp. 909-913, 2010.

J.Y. Han, H.Y. Jung, J.R. Cho, J.H. Choi, W.B. Bae, Bucking analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure, J. of materials processing technology, Vol. 201, pp. 742-745, 2008.

Morandi, A. C., Das, P.K. and Faulkner, D., "Finite element analysis and reliability based design or externally pressurized ring stiffened cylinders", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 138, 171-188, 1996.

Morandi, A. C., Faulkner, D. and Das, P.K., "Frame tripping in ring stiffened externally pressurized cylinders", Marine Structures, 9, 585-608, 1996.

Burcher, R. and Rydill, L., "Concepts in Submarine Design, chap. 4, Cambridge Ocean Technology series 2", Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

Smith, C. S., "Design of submersible pressure hulls in composite materials", Marine Structure, Vol. 4, Issue 2, pp. 75 - 82, 199.

Olivas, J. D., Ravi-Chander, K. and Craigie, L., "Buckling of Filament winding cylindrical vessels subjected to external pressure", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 118, Issue 2, pp. 216 - 220, 1996.

Peros, V., "Thick-walled composite material pressure hulls : Three-dimensional laminate analysis considerations", Journal of Composite Materials, Vol. 24, No. 11, pp. 1213 - 1224, 1990.

정태환, 이종무, 홍석원, 김진봉, 안지우, "복합재 반자율 무인 잠수정의 내압선체 설계, 구조해석 및 내압시험 결과에 대한 검토 ", 한국해양공학회지, 제 18권, 제4호, pp. 52 - 58, 2004.

MSC NASTRAN THEORY MANUAL, 2005.

ASME Pressure & Vessel Code, Section X Fiber Reinforce Plastic Pressure Vessel, 2010.

MacKay, John. R., "Structural Analysis and design of Pressure Hulls", Defence R&D technical Memorandum., 2007.

Lee, D. G., Jung, K. S. and Choi, J. H., "Composite material mechanics and manufacturing Technology," Sigma Plus, pp. 68-73, 1998.



조종래

- 1959년생
- 1993년 KAIST 정밀공학과 박사
- 1984-95년 두산중공업 연구원
- 현 재 : 한국해양대학교 공과대학 교수
- 관심분야 : 비선형해석, 구조건전성평가
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : cjr@hhu.ac.kr



정해영

- 1972년생
- 2012년 부산대학교 박사
- 현 재 : LG전자
- 관심분야 : 최적화 해석, 비선형 구조강도해석
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : hugesea2000@gmail.com