

# 외압을 받는 복합재 셸의 좌굴해석을 위한 실험 및 수치 해석 연구

정해영<sup>1</sup>, 조종래<sup>2</sup>, 배원병<sup>3</sup>, 권진희<sup>4</sup>, 최진호<sup>4</sup>

## Study of numerical analysis and experiment for composite pressure hull on buckling pressure

H.Y.Jung, J.R.Cho, W.B.Bae, J.H.Kwon, J.H.Choi

### Abstract

The results of an experimental and analytical study of composite pressure hull on buckling pressure are presented for URN 300. Composite tensile test was done to know the composite material properties applied FE analysis for URN composite. We predicted the buckling and post buckling analysis of composite laminated cylindrical panels under external compression by using ABAQUS /Standard[Ver 6.4]. To obtain nonlinear static equilibrium solutions for unstable problems, where the load-displacement response can exhibit the type of nonlinear buckling behavior, during periods of the response, the load and/or the displacement may decrease as the solution evolves, used the modified Riks method. The modified Riks method is an algorithm that allows effective solution of such cases [7]. Experiments were conducted to verify the validation of present analysis for cross-ply laminated shells.

The shells considered in the study have two different lamination patterns,  $[\pm 45/0/90]_{18s}$  and  $[0/90]_{18s}$ . Cylindrical panel of experiment and analysis have the radius of 200mm, length of 210mm and 60 degree of cutting angle. The critical load from experiment is 69% of that of numerical analysis, because the fracture of matrix was generated before buckling. So URN 300 is not proper to use at the condition under high external pressure.

Key Words: Cylindrical shell (원통셸), Composite (복합재), Lamination pattern (적층순서), Buckling(좌굴)

### 1. 서론

지금까지의 셸 좌굴에 대한 연구는 주로 횡하중이나 압축하중 중 하나만을 받는 경우에 대한 연구였다. 그러나 실제 잠수함과 같은 경우 급힘 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.

선체의 재질이 등방성 고강도강일 때 내압선체강도추정을 위해 해석적인 방법들은 내압선체의 좌굴모드별로 적합하게 개발된 해석 식(analytic formula)을 사용하고 있다. 또한 유한요소법을 이용한 수치적인 해석방법으로 내압선체의 전체 구조 부재를 유한요소 모델링을 통해 좌굴모드와 강도를 구하고 있다. 그러나 복합재에 대해서는 이러한 해석 식이 개발되어 있지 않기 때문에 주로 유한요소법을 통해서 해석을 하고 있다. [1], [2], [3]

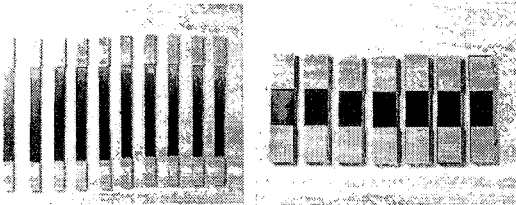
1. 부산대학교 기계공학부  
2. 한국해양대학교 기계정보공학부, cjr@hhu.ac.kr  
3. 부산대학교 기계공학부, wbae@pnu.edu  
4. 경상대학교 기계항공공학부

본 연구에서는 수중운동체의 적용될 복합재 재질 중 URN300에 대하여 압축하중 실험을 수행하고 상용 소프트웨어 ABAQUS[Ver6.4]를 이용하여 실험과 동일 조건으로 해석을 수행 비교 하였다.

## 2. 복합재 인장시험

### 2.1 시편 제작

복합재 인장시험에 사용된 복합재 소재는 카본/에폭시 프리프레그 테이프인 URN300으로 실험방법과 시편의 치수는 ASTM D3039에서 제시한 규격에 따라 수행하였으며[6], Fig. 1에는 완성된 시편을 나타내었다.



(a) 0° (in plane) (b) 90° (out of plane)

Fig. 1 Tensile test specimen

### 2.2 측정

사용장비는 섬유방향에 대해 0°로 적층한 시편에 대해서는 50톤 만능시험기(Instron 4469)를 사용하였으며, 섬유방향을 90°로 적층한 시편에 대해서는 5톤 만능시험기(UH-50A)를 사용하였다.

### 2.3 인장시험결과

인장시험에 의해 구해진  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $v_{12}$ ,  $v_{21}$ 를 Table 1에 나타내었다. 이 결과를 이용하여 복합재의 유한요소해석을 실시하였다.

Table 1 Material properties of URN300

Elastic modulus(GPa)	$E_1$	368.1
	$E_2$	6.6
Poisson's ratio	$v_{12}$	0.364
	$v_{21}$	0.0065

## 3. 복합재를 이용한 유한요소해석

좌굴해석에 쓰여질 복합재는 적층복합재로서, 적층복합재의 경우 적층각과 적층순서가 내압선체의

강도를 결정하게 된다. 따라서 이러한 적층복합재를 이용한 내압선체의 설계를 위해서는 적층각과 적층순서에 따른 비선형 좌굴해석을 수행하여야 한다.

### 3.1 모델링 및 경계조건

적용모델인 반자율 무인 잠수정의 내압선체를 단순화하여 복합재 원통판넬을 상용 소프트웨어 ABAQUS/CAE로 모델링 하였다 원통판넬의 반경은 200 mm이고 길이는 모두 210 mm이다. 직선경계는 축방향 변위를 허용하는 단수지지, 곡선경계에서는 무구속 조건이다. 원통셀로 모델링하였으며 이러한 모델링과 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 복합재 시편은  $[0_2/90_2]_S$  과  $[\pm 45/0/90]_S$ 의 두 가지 적층으로 제작하였다. 사용한 재료는 SK 케미컬의 URN 300이다. URN 300은 초고강성 탄소섬유를 사용한 복합재료로서 통상적인 탄소섬유의 2배 정도에 달하는 강성을 가지는 반면 취성이 강하고 강도가 약한 문제점이 있는 것으로 알려져 있다.

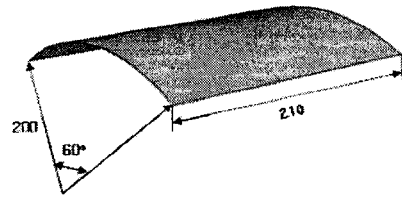


Fig. 2 Dimension of a cylindrical panel

### 3.2 좌굴해석

#### 3.2.1 고유치 해석과 비선형 좌굴해석

비선형 좌굴해석에 필요한 좌굴형태를 알기 위하여 우선 고유치 해석을 수행하였으며, 좌굴형태 및 선형좌굴계수를 예측하였다. 그러나, 고유치 해석만으로는 좌굴을 정확하게 예측할 수는 없고, 실제 제작되는 내압선체는 제작시의 오류로 인한 원형일탈이나 잔류응력 등의 초기 결함을 지니고 있으며, 수중운동체의 운행 시에 높은 압축하중이 내압선체에 작용하면 구조부재의 변형으로 인한 기하학적 비선형 및 선체 재료의 비선형이 나타날 수 있으므로 선형좌굴해석뿐만 아니라 비선형 좌굴해석이 반드시 필요하다.

본 연구에서 채택한 초기결함법[4], [5]은 선형 좌굴모드와 같은 형상의 미소한 변형을 초기조건으로 부여하고 이에 대한 비선형 구조해석을 수행하여 하중-변위 관계를 구한 뒤, 하중이 도달할 수

있는 최대값을 찾는 방법이다. 하중-변위 관계를 구하기 위한 비선형 해석법으로는 하중증분법, 변위증분법, 릭스방법(Riks method) 등이 있으며[7], 상용유한요소 코드를 이용한 좌굴후의 거동을 고려하기 위해서 제하경로를 찾을 수 있는 비선형 해석법인 릭스 방법을 채택하였고 초기결함은 고유치 해석에 의한 첫 번째 모드로 가정하였다[8].

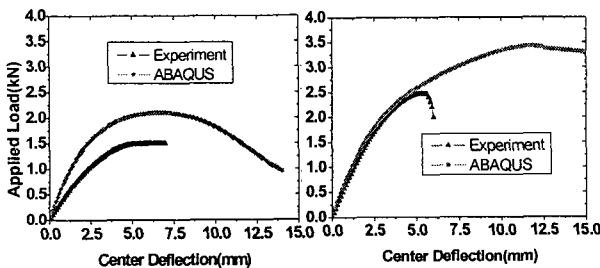
### 3.2.2 해석수행방법

(1) 적층형태에 따라서 고유치 해석을 수행하였고 비선형 좌굴해석에 적용될 초기압력을 구하였다.

(2) 고유치 해석에서 구한 첫 번째 형상과 좌굴 계수를 이용하여 비선형좌굴해석의 초기형상과 초기압력으로 적용하여 비선형 해석을 수행한다.

### 3.3 해석결과 및 고찰

Fig. 3 에서는 적층순서①인  $[0_2/90_2]_s$  와 적층순서②인  $[\pm 45/0/90]_s$  에 대한 유한요소 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig.5 에서는 변형 형상을 나타낸 것이다. 새(bird) 날개 모양의 전형적인 좌굴이 발생하고 있다. ①재질에 대해서는 좌굴하중이 2380N 으로 나오고 ②재질에 대해서는 좌굴 하중이 3470N 이 발생한다. Table 2 에서는 좌굴압축 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다.



(a)  $[0_2/90_2]_s$  (b)  $[\pm 45/0/90]_s$   
Fig.3 Curve of load-displacement

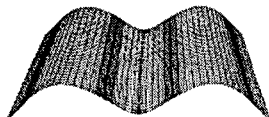


Fig.4 Panel shape after buckling

## 4. 복합재 원형 패널의 좌굴 실험

### 4.1 시편 제작

복합재 시편은  $[0_2/90_2]_s$  과  $[\pm 45/0/90]_s$  의 두 가지 적층으로 제작하였다. 사용한 재료는 SK 케미컬의 URN 300 이다. URN 300 은 초고강성 탄소섬유를 사용한 복합재료로서 통상적인 탄소섬유의 2 배 정도에 달하는 강성을 가지는 반면 취성이 강하고 강도가 약한 문제점이 있는 것으로 알려져 있다.

### 4.2 측정

직선경계는 축방향 변위를 허용하는 단수지지, 곡선경계에서는 무구속 조건이다. 하중은 Fig.5(a) 에 보인 바와 같이 직경 6.0 mm 의 강 환봉을 이용하여 판넬의 종축방향으로 선분포 형태로 1 mm/min 의 속도로 가하였다. 재료실험기는 INSTRON 5582 를 사용하였다.

### 4.3 실험결과

Table 2 에서 나타나는 거와 같이 실험과 해석의 차이가 크게 나는 일차적이고 주된 이유는 URN 300 의 재료 특성 때문으로 판단된다. 실험과 해석 모두 동일한 형태의 좌굴을 보이며, 적층순서에 따른 좌굴형상의 차이는 크지 않다.  $[\pm 45/0/90]_s$  판넬의 경우 굽힘과 비틀림 변형을 연계시키는 연계강성 항이 존재하기 때문에 변형의 모양이 정대칭일 수는 없다. Fig.5(b) 실험 사진에서 볼 수 있는 것처럼 파손은 하중이 가해지는 종축을 따라 원통판넬의 내측에서 기지파손 (matrix failure) 의 형태로 발생하여, 90 도층 즉 원주방향 보강섬유가 끊어질 때 최종파손에 도달하게 된다.



(a) Before buckling (b) After buckling  
Fig.5 Cylindrical panel shape after buckling

Table 2 Comparison of buckling load

Pattern	Experiment	ABAQUS
$[/0/90]_s$	1488[N]	2380[N]
$[\pm 45/0/90]_s$	2480[N]	3570[N]

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 수중운동체의 복합재 내 압선체의 재료로 쓰여질 URN300 에 대한 고유치 해석과 비선형 좌굴해석을 상용 유한요소 코드인 ABAQUS 를 사용하여 수행하였고 동일 조건으로 압축 실험을 수행하였어 이를 비교 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 좌굴에 대한 강성을 고려하여 고강성 탄소 복합재 URN 300 (SK 케미컬)을 실험 및 해석용 소재로 선정하고 오토클레이브 공법으로 시편을 제작하여, 섬유방향 및 기지방향 인장강성·강도, 섬유방향 및 기지방향 압축강도·강성, 전단강성·강도, 3 점 굽힘시험을 하여 해석에 필요한 기본 물성치를 확보하였다.

2. 초고강성 탄소섬유를 사용한 복합재인 URN 300 을 사용한 복합재 원통판넬 시편을 제작하고 좌굴실험과 해석을 수행하였다. 실험 값이 해석 값의 60% 정도로 나타나는데 이는 좌굴 이전에 심각한 재료손상이 발생하여 좌굴하중을 현저히 저하시키는 것으로 나타나 높은 수압을 견디는 복합재 후판 구조물의 제작에는 적절하지 못한 것으로 판명되었다. 따라서 강성이 약간 낮더라도 기지의 강도가 높은 복합재에 대한 연구를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 (국방부가 지정한) 수중운동체특화연구센터의 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] 손호재, 박창수, 잠수함공학 개론, 대영사, 1995.
- [2] 한국해양연구원, “차세대 심해용 무인잠수정 개발”, 해양수산부, pp. 146-190, 2003.
- [3] 이재신, 선박 및 해양구조물: 좌굴강도학, 세종출판사, 1996.
- [4] Messenger, T, Buckling of imperfect laminated cylinders under hrdostatic pressure, Composite structures, vol. 53, pp. 301-307, 2001.
- [5] W. Guggenberger, "Buckling and Postbuckling of Imperfect Cylindrical Shells under External Pressure", Thin-Walled Structures, Vol. 23, pp. 351-366, 1995.
- [6] ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites, 1989.
- [7] ABAQUS User's Theory Manual Chapter 2 Buckling and Post buckling
- [8] 박치모, 이승훈, “상용소프트웨어를 이용한 원환 보강 원통의 최종강도해석 (II)”, 한국해양공학회지, 제 16 권 제 1 호, pp. 36-40, 2002.