

# 복합재 내압선체의 적층에 따른 좌굴하중 변화에 관한 유한요소 해석

손정윤<sup>1</sup>, 조종래<sup>2</sup>, 배원병<sup>3</sup>, 권진희<sup>4</sup>, 최진호<sup>4</sup>, 조윤식<sup>5</sup>, 김두기<sup>5</sup>

## Finite Element Analysis on Buckling Pressure by the Lamination of Composite Pressure Hull

J.Y.Son, J.R.Cho, W.B.Bae, J.H.Kwon, J.H.Choi, Y.S.Cho, T.K.Kim

### Abstract

This paper deal with the optimal lamination condition of cylindrical shell applied new composite URN300 for a study of composite empirical formula. Finite element analyses for isotropic materials considered element numbers and boundary conditions are compared with existing empirical formulas to apply FE analysis for composite. And composite tensile test is done to know the composite material applied FE analysis for composite. The results of FE analyses for isotropic materials have indicated that Optimal element number and boundary condition were 1600 and both simple support. These conditions were applied in composite FE analyses.

Ply orientations and lamination patterns in FE analyses for composite were considered. Ply orientations are 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°. Lamination patterns are  $[\pm \theta/0/90]_{14s}$  and  $[\pm \theta_{14}/0_{14}/90_{14}]_s$  in FE analysis. Lamination pattern  $[\pm \theta_{14}/0_{14}/90_{14}]_s$  is the equivalent model of  $[\pm \theta/0/90]_{14s}$ .

At the result of this study, the FE analyses for composite have indicated that the optimized ply orientation 75° is and real model must use in FE analysis for accurate results.

Key Words : Cylindrical shell (원통셸), Composite (복합재), Ply orientation (적층방향), Lamination pattern (적층순서)

### 1. 서론

심해에서 운항하는 수중운동체는 외부의 높은 압축하중을 받게 되므로 충분한 강도를 지니도록 내압선체를 설계하여야 한다. 보통 수중운동체의 내압선체는 보강 원통형 셸구조로 구성되고, 양 끝단에 구형 또는 타원셸이 부착되는 형상을 지닌다 [1]. 지금까지 이러한 셸 구조물의 해석을 위한 수많은 연구가 이루어져 왔고, 이에 따른 다양한 셸 이론들이 제시되어 왔다. 특히 셸이 압축하중을 받

을 경우 재료의 강도보다 훨씬 낮은 응력에서 좌굴이 발생하게 되어 구조적으로 큰 문제를 일으킬 수 있어 셸의 압축 좌굴과 관련된 연구는 최근까지도 계속되고 있다.

수중운동체의 경우 잠수심도에 영향을 끼치는 것은 수중운동체의 중량으로서 이러한 중량을 줄이려는 방안으로서 수중운동체의 내압선체의 재질을 고강도강 대신 알루미늄, 티타늄 뿐만 아니라 복합재를 사용한 연구들이 진행되어졌다[2~5]. 특히 복합재는 종류, 적층순서, 적층각에 따라 강도가

1. 넥센타이어㈜  
2. 한국해양대학교 기계정보공학부 cjr@hhu.ac.kr  
3. 부산대학교 기계공학부, wbae@pnu.edu  
4. 경상대학교 기계항공공학부  
5. 국방과학연구소 2체계 개발본부

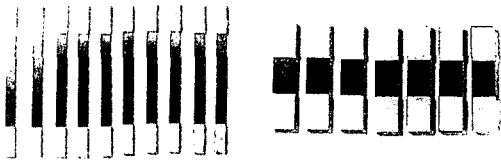
변화하므로 복합재에 대한 연구는 계속되어지고 있다.

본 연구에서는 고심도 수중운동체의 내압선체에 새롭게 적용될 URN300 에 대한 기초 데이터를 확보하기 위하여 상용 유한요소 코드인 ANSYS 7.0 을 적용하여, 복합재 원통셀의 적절한 요소수와 경계조건을 구하기 위한 등방재 원통셀과 복합재 원통셀의 해석을 수행하였다.

## 2. 복합재 인장시험

### 2.1 시편 제작

복합재 인장시험에 사용된 복합재 소재는 카본/에폭시 프리프레그 테이프인 URN300 으로 실험방법과 시편의 치수는 ASTM D3039 에서 제시한 규격에 따라 수행하였으며[6], Fig. 1 에는 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 50 톤 만능시험기(Instron 4469)를 사용하였으며, 섬유방향을 90°로 적층한 시편에 대해서는 5 톤 만능시험기(UH-50A)를 사용하였다.

### 2.3 인장시험결과

인장시험에 의해 구해진  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{21}$  를 Table 1 에 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	$\nu_{12}$	0.364
	$\nu_{21}$	0.0065

## 3. 등방재를 이용한 유한요소해석

### 3.1 모델링 및 경계조건

적용모델인 반자율 무인 잠수정의 내압선체를 단순화하여 원통셀로 모델링하였으며 이러한 모델링과 치수를 Fig. 2 에 나타내었다.

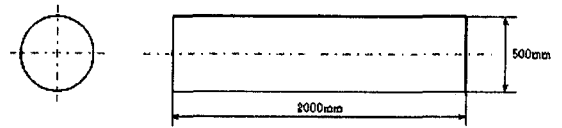


Fig. 2 Dimension of a cylinder user in calculation

해석에 사용될 물성치는 기존의 내압선체에 사용되어진 HY-80 의 물성치를 해석에 적용하였으며, 이는 Table 2 과 같다.

Table 2 Material properties of HY-100

Tensile yield strength(MPa)	689
Modulus of elasticity(GPa)	205
Poisson's ratio	0.28

두께는 ASME 코드집에 의해 구하였으며[7], 경계조건은 양단 단순지지, 단순-고정지지, 양단 고정지지 조건으로 나누어 해석을 수행하였다.

### 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 선형 재료의 비선형이 나타날 수 있으므로 선형좌굴해석뿐만 아니라 비선형 좌굴해석이 반드시 필요하다.

본 연구에서 채택한 초기결함법은 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[8], 상용유한요소 코드를 이용한 좌굴후의 거동을 고려하기 위해서 제하경로를 찾을 수 있는 비선형 해석법인 릭스 방법을 채택하였고 초기결함은 고유치 해석에 의한 첫 번째 모드로 가정하였다.

### 3.2.2 해석수행방법

(1) 적절한 요소 분할 정도를 결정하기 위하여 길이 : 2000mm, 반경 : 250mm, 두께 : 13.5 mm 의 원통셀을 여러 가지 요소수로 분할하여 각각 고유치 해석을 수행하였다. 고유치 해석에 의한 선형좌굴압력은 Von Mises 좌굴이론식과 고전식에 의한 좌굴압력과 비교하였다.

(2) (1)에 의해 결정되어진 요소수를 적용하여 양단 단순지지조건, 단순-고정지지조건, 양단 고정지지조건에 대해 고유치 해석을 수행하였다. 이후 해석되어질 원통셀의 적절한 경계조건을 결정하기 위함이다. (1)에서와 같이 경계조건에 따른 고유치 해석의 선형좌굴압력은 고전식에 의한 좌굴압력과 비교하였다.

(3) (1), (2)에 의해 정해진 적절한 요소망, 경계조건을 적용하여 등방재에 대한 비선형 좌굴해석을 실시하였다. 이러한 비선형 좌굴해석시 초기결함은 고유치 해석에 의한 첫 번째 모드로 가정하였다. 이러한 비선형 좌굴해석에 의한 좌굴압력은 DnV-os 식에 의한 좌굴압력과 비교하였다.

### 3.3 해석결과 및 고찰

여러 가지 요소수에 따른 선형좌굴압력을 Fig. 3에 나타내었으며, 요소 수에 따른 선형좌굴압력은 요소 수 약 1600 개에서 수렴됨을 알 수 있다.

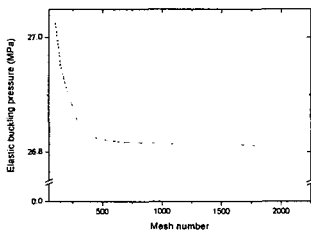


Fig. 3 Elastic buckling pressure in accordance with Mesh fineness

Von Mises 좌굴이론식과 고전식에 의한 선형좌굴

압력은 각각 15.65MPa, 26.08MPa 로서 요소수 1600 개를 사용하여 구한 선형좌굴압력인 26.81 MPa 과 비교하면 고전식에 의한 결과와 잘 일치하였으므로, 이후 적용한 이론 식은 고전식을 적용하였고 해석시 요소수는 1600 개를 사용하였다.

3 가지 경계조건에 따른 고유치 해석 결과와 고전식에 의한 결과를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Elastic buckling pressure of eigen buckling Analysis with 3-boundary conditions

		Pressure(Mpa)
Simulation	Both simple	26.81
	Simple - clamped	26.96
	Both clamped	28.91
Classical formula		26.08

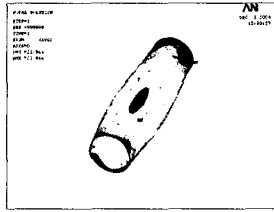
양단 단순지지조건에서 가장 낮은 좌굴압력을 보이고 있고 이러한 좌굴압력을 고전식에 의한 결과와 비교하였을 때 가장 잘 일치하고 있다.

등방재에 대해서 요소수, 경계조건의 변화에 따른 고유치해석을 각각 수행하였다. 적절한 요소수와 경계조건을 등방재에 대한 비선형 좌굴해석에 적용하여 수행하였다.

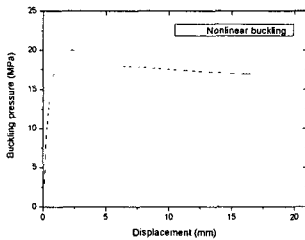
최대 변위 부분의 좌굴압력과 변위의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

극점을 통과한 뒤 좌굴압력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 등방재 고유치 해석 및 비선형 좌굴해석에 의한 결과와 DnV-os 식에 의한 결과를 Table 4에 나타내었다.

비선형 좌굴해석에 의해서 구해진 좌굴압력은 이 극점에서의 압력으로서 그 값은 20.48MPa 이다. 경험식에 의한 좌굴압력은 12.62MPa 로 비선형 좌굴해석에 의한 좌굴압력 20.48MPa 과 비교하였을 때 38%의 차이가 생겼다. 하지만 이러한 차이의 이유는 원통형 부재에 발생하는 응력, 즉 축방향이나 원주방향의 용접에 의해 생기는 응력과 외관의 냉간압연, 형상불안정을 교정하는 동안 생기는 응력에 의한 부분을 해석상에서는 고려하여 주지 못했기 때문이다. 이러한 좌굴강도를 크게 해치는 영향을 이론적으로 좌굴압력값의 산출에 도입한다는 것은 힘든 상황이며 경험식에서 보여지는 것처럼 수많은 실제 시험을 통하여 이에 대한 영향을 나타내는 계수를 계산식에 도입 적용하여야 한다.



(a) Max displacement position



(b) Pressure-displacement curve

Fig. 4 Maximum displacement position and pressure-displacement curve in nonlinear analysis of isotropic material

Table 4 Comparison of buckling pressure for isotropic cylindrical shell

	Nonlinear buckling		Eigen buckling
	Simulation	DnV-os	
Pressure(MPa)	20.48	12.62	26.81

#### 4 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.

##### 4.1 모델링 및 경계조건

복합재 좌굴해석에 사용된 요소, 모델링의 형상 및 치수는 등방재 좌굴해석과 동일하고 사용된 복합재는 URN300 으로서 그 적층두께는 전체두께에

서 적층수로 나누어 구하였다.

적층순서는 등가모델로서의 두가지를 비교하기 위하여 적층순서①인  $[\pm\theta/0/90]_{14s}$  와 적층순서②인  $[\pm\theta/14/0/14/90]_{14s}$  를 사용하였다.

두 적층순서에 대하여 적층각  $15^\circ$  는 간격으로 변화시켰으며, 경계조건은 앞선 등방재 고유치 해석결과에서 나온 양단 단순지지조건을 사용하였다.

#### 4.2 좌굴해석

##### 4.3.1 고유치 해석

적층복합재의 경우 좌굴압력에 영향을 미치는 인자는 적층각과 적층순서로서 이러한 적층각과 적층순서를 변화시키면 좌굴압력이 변화한다.

##### 4.3.2 비선형 좌굴해석

고유치 해석에서 적층각의 변화에 의한 첫 번째 모드의 형상과 첫 번째 모드의 선형좌굴계수의 1.1 배를 초기압력으로 하여 비선형 좌굴해석을 수행하였다.

##### 4.3.3 해석수행방법

(1) 적층각을  $15^\circ$  씩 변화시켜가며  $0^\circ \sim 90^\circ$  에서 고유치 해석을 수행하였고 비선형 좌굴해석에 적용될 초기압력을 구하였다.

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

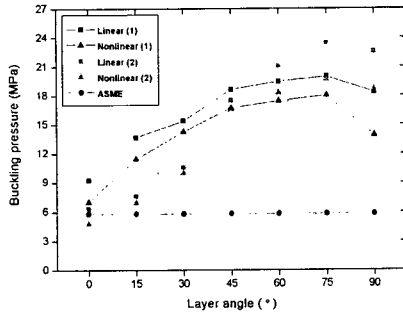
#### 4.3 해석결과 및 고찰

Table 5 에 ASME 에서 규정된 복합재 원통셴의 허용압력식에 의한 결과와 적층순서와 적층각에 의한 고유치 해석결과와 비선형좌굴해석의 결과를 나타내었으며, Fig. 5 에는 적층각과 적층순서에 따른 좌굴압력을 나타내었다.

적층순서 ①, ②에 대한 고유치 해석과 비선형 좌굴해석을 비교해 본 결과 최대좌굴압력과 최저 좌굴압력은 둘다 적층각  $75^\circ$  와  $0^\circ$  에서 발생하였다. 그리고 적층각  $60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  에서는 적층순서 ②에 의한 좌굴압력이, 적층각  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  에서는 적층순서 ①에 의한 좌굴압력이 더 크게 발생하였다. 이로서 적층순서 ①에 대한 등가모델인 적층순서 ②는 등가모델로서 적합하지 못하고 좌굴압력에 대한 정확한 해석을 위해서는 적층순서 ①과 같이 모든 적층에 대해서 해석을 수행하여 주어야 한다.

**Table 5 Comparison of buckling pressure for composite cylindrical shell**

Angle	ANSYS(MPa)				ASME (MPa)
	[± θ/0/90]14s		[± θ 14/0/14/90]14Js		
	Eigen	Nonlinear	Eigen	Nonlinear	
0°	9.24	7.00	6.34	4.80	5.807
15°	13.68	11.45	7.64	6.93	
30°	15.35	14.24	10.56	8.00	
45°	18.59	16.70	17.49	16.53	
60°	19.43	17.43	21.07	18.26	
75°	19.95	17.99	23.41	19.66	
90°	18.30	13.89	22.52	18.92	



**Fig. 5 Comparison of buckling pressure for two lamination patterns**

## 5. 결론

본 연구에서는 기존의 수중운동체의 내압선체의 재료로 쓰여진 HY-80 과 앞으로 복합재 내압선체의 재료로 쓰여질 URN300 에 대한 고유치 해석과 비선형 좌굴해석을 상용 유한요소 코드인 ANSYS 7.0 을 사용하여 수행하였다. 등방재의 경우 Von Mises 좌굴이론식 및 DnV-os 식과 비교하였고 복합재의 경우 ASME 에 의한 복합재 원통셸의 허용압력식과 비교하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. URN300 을 이용한 복합재 원통셸의 경우 균일 횡압력을 받는 적층복합재 원통셸의 최대 좌굴압력과 최저 좌굴압력이 나오는 적층각은 75° 와 0° 이다.

2. 등방재 원통셸의 경우 고전식의 결과가 해석결과와 잘 일치하였지만 잔류응력과 형상불안정의 영향을 고려한 비선형 좌굴해석과 DnV-os 경험식에 의한 결과차이는 38%정도였지만 형상불안정에 대한 좌굴계수를 고려하면 잘 일치함을 보이고 있다.

## 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 hydrostatic pressure, Composite structures, vol. 53, pp. 301-307, 2001.
- [5]. 2001 ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE SECTION X, pp. 41-45, 2001.
- [6]. ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites, 1989.
- [7]. 1998 ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE SECTION VIII Division 1, pp. 24-28, 1998.
- [8]. 박치모, 이승훈, “상용소프트웨어를 이용한 원환보강 원통의 최종강도해석(II)”, 한국해양공학회지, 제 16 권 제 1 호, pp. 36-40, 2002.