

수압을 받는 필라멘트 와인딩된 복합재 셸의 좌굴해석

Buckling Analysis of the Filament wound Composite Shell under Hydrostatic Pressure

*한정영¹, #조종태², 권진희³, 박진호³, 조상태⁴, 배원병¹, 조윤식⁵

*J. Y. Han¹, #J. R. Cho(cjr@hhu.ac.kr)², J. H. Kweon³, J. H. Choi³, S. R. Cho⁴, W. B. Bae¹, Y. C. Cho⁵

¹ 부산대학교 정밀공학과, ² 한국해양대 기계정보공학부, ³ 경상대학교 기계항공공학부, ⁴ 울산대학교 조선해양공학부, ⁵ 국방과학원

Key words : Buckling, Filament, Composite shell

1. 서론

심해에서 운항하는 수중운동체는 외부에 높은 압축하중을 받게 되므로 충분한 강도를 지니도록 설계하여야 한다. 일반적으로 수중운동체의 내압선체는 보강 원통형 셸구조로 구성되고, 양 끝단에 구형 또는 타원 셸이 부착된다. 특히 셸이 압축하중을 받을 경우 재료의 강도보다 훨씬 낮은 응력에서 좌굴이 발생하여 구조적으로 큰 문제를 일으킬 수 있으므로 셸의 압축 좌굴을 고려해야 한다. 고강도강, 티타늄합금, 알루미늄합금 등의 금속 재료로 건조되고 있는 고심도 내압구조물에 복합재와 같은 저비중 재료를 적용하여 구조물의 중량을 줄일 수 있다면 구조물의 성능향상을 기대할 수 있다.

복합재의 좌굴에 대한 실험은 장비와 비용에 있어 한계가 있기 때문에 유한요소 해석기법을 이용한 접근이 이루어지고 있다[1]. 그러나 금속과 같은 등방체의 유한요소해석결과는 실험의 결과와 잘 일치 하지만 이방체인 복합재의 유한요소 해석결과는 실험 결과와 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 유한요소 해석의 문제점을 파악하고 유한요소 모델을 최적화하여 그 차이를 줄여야 할 필요가 있다.

기존의 복합재에 관한 연구에서는 프리프레그 적층으로 제작된 복합재에 대한 연구가 주를 이루었다[2,3]. 필라멘트 와인딩(filament winding) 기법으로 제작된 복합재의 응력과 변형해석에 관한 연구[4]는 일부 진행되었으나, 압축하중에 대한 셸구조물의 좌굴해석에 대한 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 필라멘트 와인딩 복합재에 대한 유한요소 좌굴해석을 수행하여 복합재 물성치 입력 방법과 요소의 종류에 따른 해석결과의 차이를 살펴보고, 압축하중을 받는 셸구조물의 적합한 해석방법을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 복합재 원통셸의 유한요소 좌굴해석을 위해 유한요소해석을 사용하였다. 필라멘트 와인딩 복합재의 물성치 입력은 등가물성치를 이용하는 방법과 적층물성치를 사용하는 방법이 사용되었다. 그리고 솔리드(Solid) 요소와 셸(Shell) 요소를 사용하여 좌굴 압력에 대한 요소의 영향을 비교하고자 하였다. 그리고 수압 좌굴 실험을 수행하여 유한요소 해석 값과 그 결과를 비교하여 유한요소해석 방법에 대한 타당성을 검증하고자 한다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 조건

심해 고압을 견딜 수 있는 후판 복합재 원통셸은 현실적으로 실험실 수준에서의 제작이 어렵다. 따라서 전문 복합재 압력용기 회사에 의뢰하여, 필라멘트 와인딩 기법으로 반경 150mm, 길이 695mm, 공칭두께 8mm의 복합재 원통셸을 제작하였다.

3.2 소재 및 물성치

원통셸의 제작에 사용된 복합재는 탄소섬유 T700을 사용하였

고, 이렇게 제작된 복합재의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of T700

Material	T700	
Elastic modulus(GPa)	E1	120.7
	E2	8.5
	E3	8.5
Shear modulus(GPa)	G12	3.4
	G23	2.7
	G13	3.4
Poisson's ratio	v12	0.253
	v23	0.421
	v13	0.253

Fig. 1와 같이 제작된 모델은 ±30°의 각도로 90% 와인딩을 한 뒤, 최종 10%는 90° 즉, 길이 방향으로 수직방향으로 와인딩을 하였다.



Fig. 1 Model of composite cylindrical shell

3.3 실험장비

실험에 사용된 압력탱크를 Fig. 2에 나타내었다. 이 압력탱크는 15MPa의 압력까지 가할 수 있고, 수용할 수 있는 시험모델의 크기는 직경과 길이가 각각 600mm, 1200mm이다.



Fig. 2 Set-up for buckling test

4. 유한요소 좌굴해석

4.1 가정 및 조건

필라멘트 와인딩으로 제작된 복합재의 망상구조는 다음과 같은 가정을 적용하여 유한요소 좌굴해석을 수행하였다.

필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 복합재의 물성치를 입력하는 방법에는 등가물성치를 사용하는 방법과 적층 물성치를 사용하는 방법으로 크게 두 가지가 있다.

먼저 등가물성치 방법은 복합재료를 구성하는 섬유 및 기지의 강성이나 컴플라이언스를 통하여 하나의 플라이로 구성되어 있다고 가정하는 것이고 적층 물성치 방법은 망상구조의 복합재가 섬유방향이 대칭인 플라이들이 적층된 적층판과 같다고 가정하여 플라이의 방향과 적층수를 고려하여 해석하는 방법이다.

4.2 유한요소 좌굴해석 조건

필라멘트 와인딩 복합재 원통 셀의 유한요소 좌굴해석 해석을 위하여 솔리드 요소와 셸 요소로 모델링하였다. 등가물성치 방법은 Table 1의 물성치를 적용하였으며 등가 물성치 방법에서는 Table 2와 같이 계산된 물성치를 적용하여 단일 층의 복합재료로 가정하였다. Table 2의 물성치는 MSC Patran을 이용하여 계산된 결과이다.

Table 2 Material property of T700 by effective modulus

Material		T700
Elastic modulus(GPa)	E1	51.28
	E2	20.9
Shear modulus(GPa)	G12	22.7
Poisson's ratio	v12	0.75

4.3 유한요소 좌굴해석 결과

4.3.1 적층 물성치 방법

실제 필라멘트 와인딩 공정에 적용되는 와인딩 방식을 그대로 물성치를 모델링할 수는 없다. 따라서 플라이를 여러 개로 나누어 적용하는 방식으로 $\pm 30^\circ$ 와 90° 를 모델링하였다.

Table 3에 각 해석 조건에 따른 좌굴압력 값을 나타내었다.

Table 3 The buckling pressure by the stacking property method

Orientation	Element type	Buckling pressure(MPa)	
		Eigen	Non linear
[$\pm 30/90$]	Shell	4.7	4.7
	Solid	4.8	4.7

4.3.2 등가 물성치 방법

Table 4에 좌굴 해석으로부터 예측된 각 조건 별 좌굴압력을 나타내었고, 적층 물성치 방법에서와 마찬가지로 솔리드 요소와 셸 요소의 좌굴 압력은 거의 유사하였다.

Table 4 The buckling pressure by the effective property method

Orientation	Element type	Buckling pressure (MPa)	
		Eigen	Non linear
[$\pm 30/90$]	Shell	8.5	8.5
	Solid	8.5	8.4

4.4 유한요소 해석기법의 제안

좌굴 해석의 결과와 실험의 결과를 비교 하여 Table 5에 나타내었고, 이로부터 솔리드 요소와 셸 요소의 좌굴 압력 차이는 거의 없었다. 적층물성치 방법과 등가 물성치 방법에 대한 유한요소

좌굴해석의 결과는 실험의 결과와 약 14% 및 107%의 오차를 나타내었으며, 적층 물성치 방법의 결과가 등가 물성치 방법의 결과에 비하여 실험의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 재료의 결함, 섬유와 기질의 비율, 그리고 우레탄 코팅 등과 같은 외부요소를 정확히 적용시키지 못한 것이라고 판단된다. 특히, 등가 물성치 방법에서 위와 같은 외부요소들이 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 5 Comparison of buckling pressure

		Buckling pressure (MPa)	Error (%)
Experiment		Aver. 4.1	-
Stacking Method	Shell	4.7	14
	Solid	4.7	14
Equivalent Method	Shell	8.5	107
	Solid	8.4	107

5. 결 론

본 연구는 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 복합재 원통셀의 유한요소 좌굴해석 기법을 개발하기 위하여 수행하였다. 실제 수압실험과 유한요소 해석의 결과를 비교한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 등가 물성치 방법에 의한 좌굴 해석에 비하여 적층 물성치 방법에 의한 좌굴 해석이 실험과 더 일치하였다.
- (2) 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 복합재 원통셀의 유한요소 좌굴해석을 수행함에 있어 솔리드 요소와 셸 요소의 해석 결과는 거의 유사하였다.
- (3) 적층 물성치 방법에 의한 좌굴해석의 결과는 실험과 14%의 오차가 있었으며, 정확한 물성치의 측정 또는 계산방법을 정립함으로써, 오차를 감소시킬 수 있다.

후기

본 연구는 수중운동체특화연구센터의 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

1. Kundu, C. K. and Sinha, P. K., 2007, "Post buckling analysis of laminated composite shells", Composite Structures, Vol. 78, pp. 316-324
2. Tafreshi, A. and Bailey, C.G., 2007, "Instability of imperfect composite cylindrical shells under combined loading", Composite Structures, Vol. 80, pp. 49-64
3. Kweon, J. H., Hong, C. S. and I. C. Lee, 1995, "Postbuckling Compressive Strength of Graphite/Epoxy Laminated Cylindrical Panels Loaded in Compression", AIAA J., Vol. 33, No. 2, pp. 217-222
4. Hwang, T. K., Hong, C. S., Kim, C. G., 2003, "Probabilistic deformation and strength prediction for a filament wound pressure vessel", Composites: Part B, Vol. 34, pp. 481-497