

횡하중을 받는 복합재 원통판넬의 후좌굴 해석

최수영* · 손희진* · 권진희** · 최진호** · 조증래***

Postbuckling Analysis of Composite Curved Panels under Lateral Loading

Soo-Young Choi, Hee-Jin Son, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Jong-Rae, Cho.

Abstract

The postbuckling analysis of composite curved panels subjected to lateral loading was conducted by a nonlinear finite element program, ACOS. Two kinds of graphite/epoxy composite materials, URN300 and USN125 were tested to verify the finite element analysis. High stiffness composite material, URN300 curved panels showed the critical failure prior to initial buckling. On the contrary USN125 curved panels showed no severe damage after snap-through. In both panels, the finite element and experimental results showed good agreement.

Key Words: 좌굴(Buckling), 후좌굴(Postbuckling), 복합재 원통판넬(Composite cylindrical panel)

1. 서론

잠수함을 비롯한 고심도의 내압 구조물에 주로 사용되는 셸 구조물은 일반적으로 재료 자체의 압축강도(compression strength)에 비해 상대적으로 매우 낮은 좌굴응력(buckling stress)을 갖는 특징이 있고, 좌굴이 발생할 때 지지하중이 급격히 감소하는 불안정좌굴(unstable buckling)을 보이게 되므로 이 같은 구조물에서는 좌굴이 특히 중요한 문제가 된다.

이미 잘 알려진 바와 같이 셸 구조물이 외압을 받으면 좌굴에 취약해지게 된다. 또한 형상에 따라서는 좌굴 후 지지하중이 급격히 저하되는 불안정 좌굴이 나타나기도 하는데 이 경우 좌굴은 그 자체로 구조물에 치명적일 수 있다[1]. 이에 따라 복합재 셸의 좌굴하중을 높일 수 있는 최적의 적층순서에 대한 연구[2] 등이 이루어지고 있다.

이러한 복합재 원통셸의 구조 해석에 있어 주의해야 할 점은 구조물에 사용되는 복합재가 일반 강구조물(steel structure)과는 달리 재료방향성과 큰 비선형성을 갖는다는 것이다. 따라서 실제 제작되는 복합재 내압선체는 제작시의 오류로 인한 원형일탈(out-of-roundness)이나 잔류응력과 같은 초기결함(initial imperfection), 혹은 심해 운행시에 받게 되는 높은 외압 때문에 발생하는 구조부재의 변형으로 인해 기하학적 비선형 및 선체재료의 비선형이 나타날 수 있다. 그러므로 좀더 실제적인 내압선체 강도의 추정을 위해서는 비선형성을 고려할 수 있는 좌굴해석기법이 필요하다.

본 연구에서는 높은 압력을 받는 고심도 수중운동체에 적용 가능한 복합재 원통셸의 좌굴특성을 살펴보고자 한다. 이를 위해 SK 케미칼의 USN125 복합재 원통판넬을 제작하여 횡분포하중 하에서의 좌굴실험을 수행하고 이를 유한요소해석 결과와 비교하여, 실제 구조물에 대한 유한요소해석 프로그램의 적용 타당성을 검토하였다.

* 경상대학교 대학원 항공공학과

** 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

*** 한국해양대학교, 수중운동체특화연구센터

2. 시편제작 및 실험

2.1 재료선정 및 시편제작

현재 국내에서 시판되는 재료 중 SK 케미칼의 URN125와 URN300을 대상으로 하여 실험과 해석을 수행하였다. USN125와 URN300의 재료상수는 Table. 1에서와 같이 기존의 실험을 통한 자료를 이용해 결정하였다.

Table. 1 Experimental and finite element results

		USN125	URN300
Elastic Modulus	E_1	131 GPa	360 GPa
	E_2	8.2 GPa	5.1 GPa
	E_3	8.2 GPa	5.1 GPa
Shear Modulus	G_{12}	4.5 GPa	5.55 GPa
	G_{13}	4.5 GPa	5.55 GPa
	G_{23}	3.5 GPa	4.55 GPa
Poisson's Ratio	ν_{12}	0.281	0.28
	ν_{13}	0.281	0.28
	ν_{23}	0.47	0.47
Tensile Strength	X_T	2000 MPa	1140 MPa
	Y_T	61 MPa	10.3 MPa
	Z_T	61 MPa	10.3 MPa
Shear Strength	S_{12}	70 MPa	40 MPa
	S_{13}	70 MPa	40 MPa
	S_{23}	40 MPa	-

실험에 사용된 원통관벌의 반경은 200 mm이고 길이는 원호길이와 같은 209.44 mm이며, 시편은 $[0_2/90_2]_S$ 과 $[\pm 45/0/90]_S$ 의 두 가지 적층으로 오토클레이브에서 제작하였다. 오토클레이브 성형 직전의 형상은 Fig. 1과 같으며, 시편 제작에 사용된 경화사이클(cure cycle)은 프리프레그 제작사인 SK Chemicals에서 제공한 표준 경화사이클을 사용하였다.

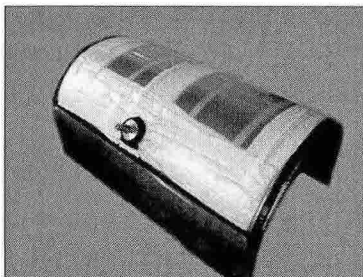


Fig. 1 Manufacturing a specimen

2.2 좌굴실험 및 결과

실험에 적용된 직선경계는 축방향 변위를 허용하는 단순지지, 곡선경계에서는 무구속 조건이며, 하중은 Fig. 2에 보인 바와 같이 직경 6.0 mm의 강 환봉을 이용하여 관벌의 종축방향으로 선분포 형태로 1 mm/min의 속도로 가하였다. 재료시험기는 INSTRON 5582를 사용하였으며 실험 결과는 Table. 2와 같다.

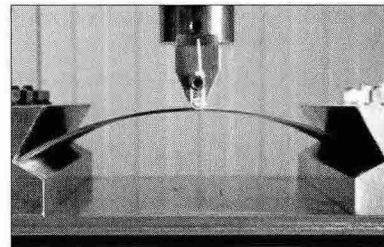


Fig. 2 Experimental set-up

Table. 2 Experimental results

USN125 (힘 단위: Newton)

시편	적층순서	P_{max}	P_{max} 평균	비고	
CP-S1	$[0_2/90_2]_S$	313.44	314.43	대칭좌굴	
CP-S2		315.41		"	
CP-S3		243.74		237.65	비대칭좌굴
CP-S4		239.27			"
CP-S5		229.95			"
QI-S1	$[\pm 45/0/90]_S$	154.42	157.57	대칭좌굴	
QI-S2		161.75		"	
QI-S3		156.25		"	
QI-S4		154.71		"	
QI-S5		168.18		"	

URN300 (힘 단위: Newton)

시편	적층순서	P_{max}	P_{max} 평균	비고
CP-R1	$[0_2/90_2]_S$	1468.48	1488.53	대칭좌굴
CP-R2		1534.77		"
CP-R3		1486.69		"
CP-R4		1478.34		"
CP-R5		1474.37		"
QI-R1	$[\pm 45/0/90]_S$	-	2479.44	조기파손
QI-R2		2521.74		비대칭좌굴
QI-R3		2380.36		"
QI-R4		2597.55		"
QI-R5		2418.12		"

3. 유한요소해석 및 결과

3.1 유한요소해석

셀의 유한요소해석은 MSC/NASTRAN(선형해석)과 ACOS(비선형해석)를 이용하여 수행하였다. NASTRAN에서는 4절점 4각형 요소인 CQUAD4를 사용하였고[3], 자체 개발 소프트웨어인 ACOS에서는 8절점 적층 셀요소를 사용하였다[2]. NASTRAN을 이용한 선형해석은 좌굴하중을 구하는 목적으로만 사용하였고, ACOS를 이용한 비선형해석에서는 Tsai-Wu 파손판정식을 적용하여 국부적 파손에 의한 강성저하좌굴후(postbuckling) 해석까지 수행하였다.

3.2 결과 및 분석

Table. 3에서와 같이 유한요소해석 값들과 실험 값들은 비교적 큰 편차 없이 일정한 경향성을 가진다. USN125의 경우 선형해석과 비선형해석에 의한 좌굴하중의 차이는 $[0_2/90_2]_S$ 직교적층에서 6.8%, $[\pm 45/0/90]_S$ 준등방성 적층에서 9.5%의 차이를 보인다. 그리고 URN300의 경우 $[0_2/90_2]_S$ 직교적층에서 0.7%, $[\pm 45/0/90]_S$ 준등방성 적층에서 40.9%의 차이를 보인다. 일반적으로 셀 좌굴문제의 경우 비선형해석의 결과가 선형해석 결과에 비해 10% 이상 낮은 값을 보이는 경우가 많다. 특히 구조물의 좌굴 전 거동이 복잡할수록 선형해석의 결과가 부정확해지게 되는데, 준등방성 판넬의 경우 굽힘-비틀림 연계효과로 인해 선형과 비선형해석의 차이가 더 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 URN300 $[\pm 45/0/90]_S$ 준등방성 적층의 경우 실험에 쓰인 시편의 경계조건에 발생한 초기결함 때문에 비선형해석과 실험에서의 좌굴하중 차이가 40% 가까이 난다는 것을 추가 해석을 통해 알 수 있었다.

Table. 3 Finite element analysis results

	적층순서	P _{cr} (N)			Error (%)
		ACOS	NASTRAN	Test	
USN125	$[0_2/90_2]_S$	187.74	169.88	161.44	14.01
	$[\pm 45/0/90]_S$	245.60	263.47	242.37	1.07
URN300	$[0_2/90_2]_S$	2448.24	2464.98	1488.53	39.20
	$[\pm 45/0/90]_S$	2485.28	4207.65	2479.44	0.23

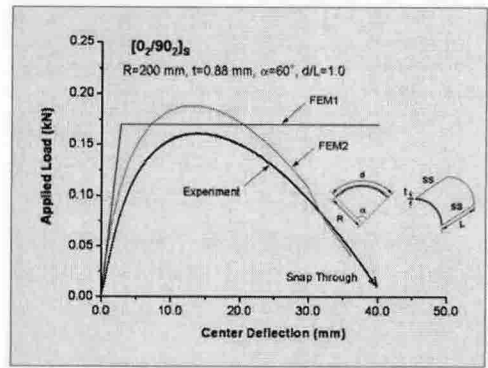


Fig. 3 Load-deflection curves of USN125 $[0_2/90_2]_S$ cylindrical panel

FEM1 : Linear(NASTRAN) FEM2 : Present(Progressive failure)

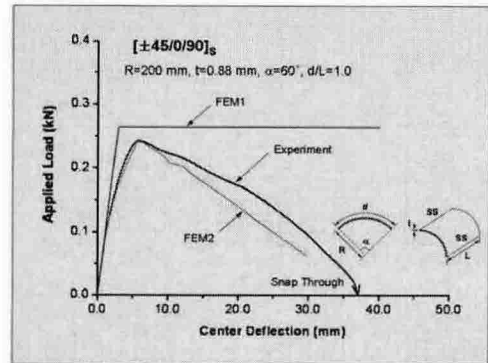


Fig. 4 Load-deflection curves of USN125 $[\pm 45/0/90]_S$ cylindrical panel

FEM1 : Linear(NASTRAN) FEM2 : Present(Progressive failure)

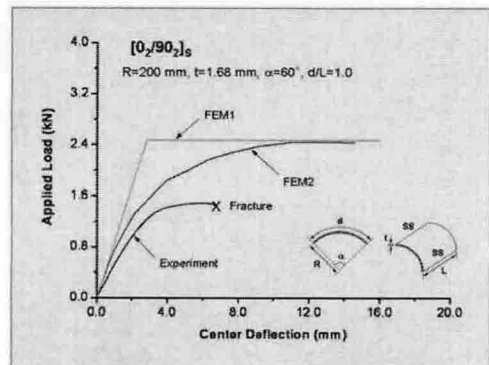


Fig. 5 Load-deflection curves of URN300 $[0_2/90_2]_S$ cylindrical panel

FEM1 : Linear(NASTRAN) FEM2 : Present(Progressive failure)

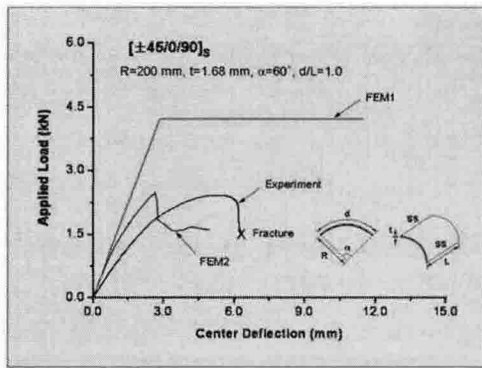
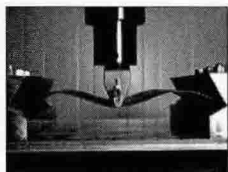


Fig. 6 Load-deflection curves of URN300 $[\pm 45/0/90]_s$ cylindrical panel

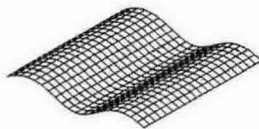
FEM1 : Linear(NASTRAN) FEM2 : Present(Progressive failure)

일반적으로 셸의 좌굴에서 실험과 해석의 결과가 10% 이상, 심지어 30% 정도까지도 차이가 나는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 셸의 좌굴은 해석에서 고려하지 못하는 기하학적, 재료적 결합에 매우 민감하기 때문이다. 본 연구에서도 실험과 해석 결과의 차이가 발생하는 것은 이러한 초기결합의 영향이 있을 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5와 6은 각각 USN125를 사용한 $[0_2/90_2]_s$ 과 $[\pm 45/0/90]_s$ 판넬의 좌굴 형상을 보인 것이다. 원통판넬의 중심선을 따라 종축방향으로 선분포 하중을 가하였기 때문에 좌굴도 중심선이 아래로 처지는 새(bird) 날개 형태로 발생한다. 실험과 해석 모두 동일한 형태의 좌굴을 보이며, 적층순서에 따라 $[0_2/90_2]_s$ 직교적층에서는 대칭좌굴모드가, $[\pm 45/0/90]_s$ 준등방성 적층에서는 굽힘과 비틀림 변형을 연계시키는 연계강성 향이 존재하기 때문에 비대칭좌굴모드가 나타났다.

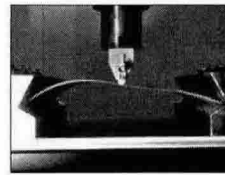


(a) Experiment



(b) Finite element analysis

Fig. 5 Buckling mode shape USN125 $[0_2/90_2]_s$ cylindrical panel



(a) Experiment



(b) Finite element analysis

Fig. 6 Buckling mode shape USN125 $[\pm 45/0/90]_s$ cylindrical panel

4. 결론

본 연구에서는 복합재 셸 구조물의 좌굴해석을 위한 비선형 유한요소 프로그램을 개발하여 다양한 셸 구조물의 좌굴해석에 적용하여 좌굴하중과 좌굴형상을 예측하였다. 개발된 프로그램을 사용한 비선형 해석의 결과는 좌굴하중과 좌굴모드에서 URN300과 USN125, 두 종류의 재료로 제작된 복합재 원통판넬 모드에 대해 잘 일치하는 결과를 보였다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 지정 수중운동체특화연구센터의 지원에 의해 수행된 것임.

참고문헌

- (1) J. H. Kweon, C. S. Hong, and I. C. Lee, "Postbuckling compressive strength of graphite/epoxy laminated cylindrical panels loaded in compression", *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 2, 1995, pp.217-222.
- (2) Tanguy Messenger, Mariusz Pyrz, Bernard Gineste, Pierre Chauchot, "Optimal laminations of thin underwater composite cylindrical vessels," *Composite Structures*, Vol. 58, 2002, pp. 529-537
- (3) MSC/NASTRAN User's Manual