

論文

외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 후판 복합재 원통의 좌굴 연구

문철진*, 허성화*, 안정희*, 권진희**, 최진호**, 조종래***, 조상래****

Buckling of Filament Wound Thick Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure

Chul-jin Moon*, Seong-Hwa Hur*, Jung-Hee Ahn*, Jin-Hwe Kweon**, Jin-Ho Choi**, Jong-Rae Cho*** and Sang-Rae Cho****

ABSTRACT

The buckling and failure of filament wound thick composite cylinders under external hydrostatic pressure were investigated by the finite element analysis and test. ACOS, MSC.NASTRAN, and MSC.MARC were used for finite element analysis. T700 carbon-epoxy filament wound composite cylinders were fabricated to have winding angles of $[\pm 30/90]_{FW}$, $[\pm 45/90]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, and $[\pm 60/90]_{FW}$, and tested to verify the finite element analysis. Among the softwares, ACOS predicted buckling load the best with about 1.7~14.3% deviation from test. Analysis and test shows cylinders do not recover the initial buckling pressure after buckling and directly lead to final failure.

초 록

외부 수압을 받는 필라멘트 와인딩 후판 복합재 원통의 좌굴 및 파손을 유한요소법과 시험으로 연구하였다. 자체 개발 프로그램인 ACOS와 상업용 프로그램인 MSC.NASTRAN(선형)과 MSC.MARC(비선형)를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 복합재 원통 시편은 T700 카본-에폭시로 필라멘트 와인딩 기법에 의해 $[\pm 30/90]_{FW}$, $[\pm 45/90]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 60/90]_{FW}$ 의 각도로 제작하여 수압시험을 수행하였다. 사용한 세 가지 프로그램 중 ACOS가 시험값과 1.7~14.3%의 차이를 보이며 좌굴 압력을 가장 잘 예측하였다. 모든 경우에 좌굴 후 지지하중이 초기 좌굴하중보다 커지지 못하고 최종파손으로 연결되었다.

Key Words : Buckling(좌굴), Postbuckling(후좌굴), Filament wound(필라멘트 와인딩), Hydrostatic pressure(정수압)

1. 서 론

최근 국내에서도 항공기에 사용되는 복합재 구조물을 자체적으로 개발하는 등 복합재 구조의

† 2008년 11월 11일 접수 ~ 2009년 1월 20일 심사완료

* 정회원, 경상대학교 대학원 항공우주공학과

** 정회원, 경상대학교 항공기부품기술연구소

교신저자, E-mail : jhkweon@gnu.ac.kr

경남 진주시 가좌동 900번지

*** 정회원, 한국해양대학교 기계정보공학부

**** 정회원, 울산대학교 조선해양공학부

설계 및 해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 선진국을 중심으로 항공우주 분야에서 축적된 복합재 설계, 제작 기술을 수중운동체와 같은 조선 해양 분야에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다. 그러나 수중운동체에 관한 연구 결과는 대부분 학계에 공개되지 않고 있어 국내에서 선진국의 연구 결과를 이용하는 것은 어려운 실정이다. 잠수함을 비롯한 고심도 내압구조물은 현재까지 대부분 고강도강, 타이타늄 합금, 알루미늄 합금 등의 금속재로 건조되어 왔다. 이렇게 금속재를 사용하는 경우 전체 부력의 절반 가까

이가 자체 선각 중량을 위해 필요하다는 것을 뜻한다. 이러한 중량민감구조물(weight sensitive structure)은 자체 중량을 줄임으로써 구조물 성능의 획기적 향상을 기대할 수 있는데 복합재를 내압구조물의 재료로 사용할 수 있게 된다면 상당한 자체 중량의 감소와 잠수 수심의 확대를 기대할 수 있다.

복합재 수중운동체에 대한 기존 연구결과들은 제한적으로 공개되어 있다. Ross[1]는 수중운동체에 관한 전반적인 개념설계 및 재료에 관한 연구를 통해 수중음파탐지에 잘 잡히지 않을 뿐만 아니라 부식에도 강한 복합재를 고심도 수중운동체에 만족하는 재료로 주장하였다. Smith[2]는 FRP(Fiber Reinforced Plastics) 복합재와 압력용기 재료로 널리 사용되는 고강도강, 타이타늄, 알루미늄의 응력, 변형, 좌굴 거동 등의 특성을 비교하고 BOSOR 4 프로그램을 사용하여 복합재 보강 원통과 비보강 원통에 대한 해석을 수행하였다. Carvelli[3]는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 반구와 원통, 원뿔 모양의 잠수정 구조를 이용하여 실제 바다에 잠수하여 시험 연구를 수행하였다. 국내에서도 한국해양연구원에서 GFRP와 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)를 혼합한 혼합형 복합재(hybrid FRP)를 사용하여 복합재 반자를 무인잠수정을 설계하고 상용유한요소 프로그램인 ANSYS, MSC.NASTRAN을 사용한 구조해석과 내압시험을 수행한 바 있다[4]. 그 외에 기존 금속재에 비해 비강성, 비강도가 뛰어나고, 스틸스 성능이 우수한 GFRP[5,6,7], BFRP(Boron Fiber Reinforced Plastics)[8], CFRP[9,10] 복합재를 고심도 내압구조물에 적용하기 위한 연구 결과가 보고되어 있다.

일반적으로 원통 형태의 구조물이 외압을 받을 경우 좌굴 후 지지하중이 감소하면서 대변형이 발생하는 경우가 많기 때문에 좌굴이 가장 중요한 설계조건이 된다. 저자들은 고심도 수중운동체 등 높은 외압을 받는 원통 형태의 구조물에 섬유강화 복합재료를 적용하기 위한 기초 연구로서 외부 수압을 받는 복합재 원통에 대한 후좌굴(postbuckling) 해석과 파손해석[11]을 수행한 바 있다. 선행 연구에서는 프리프레그를 몰드 위에 맡아서 적층하여 오토클레이브로 성형하였다. 본 연구에서는 후판 복합재 원통을 필라멘트 와인딩(filament winding)으로 제작하고 수압 시험과 좌굴해석을 수행하였다. 압력용기 형태의 구조물은 프리프레그를 적층하는 것보다는 필라멘트 와인딩으로 제작하는 것이 기하학적, 재료적 초기 결함을 줄이고 보강섬유의 연속성을 유지하여 결

과적으로 좌굴압력을 높일 수 있기 때문이다. 해석에는 자체 개발 소프트웨어인 ACOS를 사용하였고, MSC.NASTRAN(선형)과 MSC.MARC(비선형)를 이용한 해석을 병행하여 ACOS(비선형)의 결과와 비교하였다.

II. 시 험

2.1 시편 제작

시험에 사용된 모든 시편은 복합재 압력용기 전문 업체인 (주)이노컴에 의뢰하여 T700 탄소섬유를 필라멘트 와인딩 기법으로 제작한 것이다. Fig. 1, 2와 같은 공칭두께 8 mm, 내경 300 mm, 길이 695 mm의 후판 복합재 원통 총 20개를 제작하였다.

섬유각(winding angle)은 $[\pm 60]_{FW}$ 5개, $[\pm 30/90]_{FW}$ 5개, $[\pm 45/90]_{FW}$ 5개, $[\pm 60/90]_{FW}$ 5개이다. ± 30 , ± 45 , ± 60 로 표시된 것이 헬리컬 와인딩(helical winding) 층의 와인딩 각도를 의미하고 90은 후프 와인딩(hoop winding) 층을 뜻한다. 헬리컬 와인딩에 후프 와인딩으로 보강한 경우 전체 두께 8 mm의 10%인 0.8 mm를 후프 와인딩 층으로 설계하였다. 복합재 원통의 보강섬유를 보호하기 위해 원통 표면에 기지로 피막 보호처리를 하였다. Fig. 3은 후프 와인딩 층과

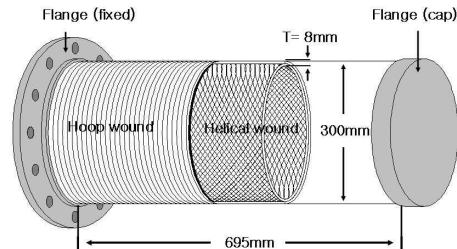


Fig. 1. Schematic of a filament wound composite cylinder with flange



Fig. 2. Composite cylinders before test

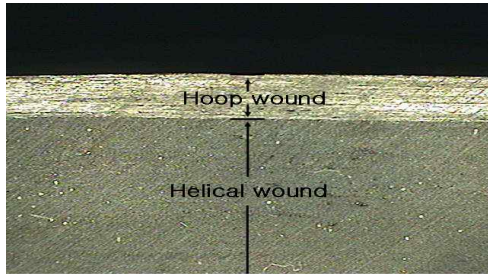


Fig. 3. Cross section of a filament wound composite cylinder



Fig. 4. Effective modulus test specimens and set-up

헬리컬 와인딩 층으로 이루어진 원통의 단면을 현미경으로 촬영한 것인데, 계면상태가 양호한 것을 알 수 있다. 후프 와인딩 층의 실측 평균 두께는 $[\pm 30/90]_{FW}$ 의 경우 18.5%, $[\pm 45/90]_{FW}$ 는 12.1%, $[\pm 60/90]_{FW}$ 는 12.8%이다. 시편과 금속 플렌치(SS41)는 ARADITE AW106과 HARDNER HV 953U를 1:0.8의 비율로 혼합한 접착제를 사용하여 상온 경화하여 결합하였다. 각 시편 종류 별로 1개씩 유효강성 시험용으로 사용하고, 현재 까지 총 14개의 시편에 대한 시험을 수행하였다.

복합재 원통 제작사에서 제공한 원통의 재료 상수 값은 섬유와 수지의 물성치로부터 혼합법칙(rule of mixture)을 이용하여 계산한 값이다. 본 연구에서는 정확한 재료상수를 파악하기 위해 와인딩 패턴에 대한 유효강성을 계산하였다. 또한 Fig. 4에서와 같이 실제 복합재 원통에서 시편을 추출하여 압축시험을 수행하여 와인딩으로 제작된 구조물의 등가 압축유효강성을 측정하였다. 제작사에서 제공한 물성치로부터 계산된 유효강성과 실험을 통해 측정된 유효강성을 비교하여 실제 복합재 원통의 좌굴해석을 위한 물성치 경감계수(knock down factor)를 구하기 위한 목적이다. 실제 압축시험 결과 유효강성이 평균 19% 낮게 나타났다. 시험 결과를 근거로 경감계수를 0.81로 설정하고 이를 업체에서 제공한 재료 물성치 데이터에 적용하여 계산된 재료 물성치 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Material properties

Property	Symbol	Property – original	Property – calibrated	Unit
Elastic modulus	E_1	149.120	120.787	GPa
	E_2	10.558	8.552	GPa
	E_3	10.558	8.552	GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.253	0.253	-
	ν_{13}	0.253	0.253	-
	ν_{23}	0.421	0.421	-
Shear modulus	G_{12}	4.138	3.352	GPa
	G_{13}	4.138	3.352	GPa
	G_{23}	3.311	2.682	GPa
Tensile strength	X_T	2548	2064	MPa
	Y_T	40	32	MPa
	Z_T	40	32	MPa
Shear strength	S_{12}	55	45	MPa
	S_{13}	55	45	MPa
	S_{23}	79	64	MPa

Table 2. Effective properties

Property	Symbol	$[\pm 30]$	$[\pm 45]$	$[\pm 60]$	Unit
Elastic modulus	E_x	37.900	12.200	8.280	GPa
	E_y	8.280	12.200	37.900	GPa
	E_z	9.330	10.000	9.330	GPa
Poisson's ratio	ν_{xy}	1.470	0.818	0.322	-
	ν_{xz}	-0.220	0.072	0.289	-
	ν_{yz}	0.289	0.072	-0.220	-
Shear modulus	G_{xy}	24.400	31.400	24.400	GPa
	G_{xz}	3.180	3.020	2.850	GPa
	G_{yz}	2.850	3.020	3.180	GPa

Property_original은 업체에서 제공한 물성치이고 1 방향이 섬유방향이다. 경감계수가 적용된 물성치를 Property_calibrated로 나타내었다. 물성치 경감계수가 적용된 Property_calibrated를 MSC.Patran을 사용하여 계산한 와인딩 각도별 유효강성을 Table 2에 제시하였다. x방향이 원통의 종축, y는 후프 와인딩 방향, z는 원주방향을 나타낸다.

2.2 수압시험

수압시험 장치는 Fig. 5에 보였다. 한쪽 끝이 열린 형태의 수압용기로 수압의 증가에 따라 구조물의 변형을 육안으로 관찰할 수 있으며, 수심 1000 m (10 MPa)에 해당하는 압력을 견딜 수 있다. 최대 시험 모델의 크기는 600 mm(D)×1500 mm(L)이다. Fig. 6은 수압시험에서 압력을 가하는 개념도이다. 원통은 수압시험 장치의 도어에 용접을 한 후 O-ring(O-ring)을 이용하여 수압용기에 장착하였다. 최대압력 40 MPa의 고압 펌프를 사용하여 압력용기에 물을 공급하여 압력



Fig. 5. Experimental set-up

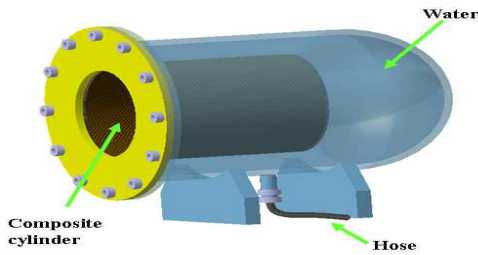


Fig. 6. Schematic of applying hydrostatic pressure

을 가하였으며 이때 압력과 변형률 및 플렌지의 축방향 변위를 각각 디지털 압력 측정기, 변형률 게이지 및 LVDT를 사용해 측정하였다.

III. 유한요소해석

좌굴 해석에는 총 3개의 유한요소 프로그램을 사용하였다. 선형해석에는 MSC.NASTRAN을 사용하였고 비선형해석에는 MSC.MARC를 사용하였다. 비선형 좌굴 및 좌굴 후 파손해석을 위해서는 자체 개발 프로그램인 ACOS를 사용하였다. NASTRAN은 CQUAD4 요소를 사용하였고 MARC에서는 4절점 두꺼운 쉘 요소인 Element 75로 해석하였다. ACOS에서는 8절점 적층 쉘 요소를 사용하였으며 절점 당 5개의 자유도를 가진다[12,13]. NASTRAN과 MARC는 복합재 실린더 부분에서 1980개의 절점과 1920개의 요소를 가지며 ACOS는 5760개의 절점과 1920개의 요소를 가진다. ACOS를 이용한 비선형 해석에서는 국부적 파손에 의한 강성저하를 고려한 후좌굴 해석까지 수행하였다. 이때 사용한 강성저하 모델은 파손이 발생한 층의 파손모드에 해당하는 강성뿐만 아니라 응력까지도 완전히 제거 된다고 보는 완전제하모델(complete unloading model) [14]이다. 파손판정식으로는 파손모드 구분이 분

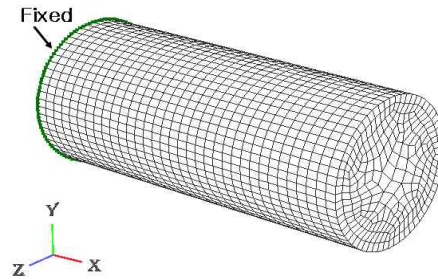


Fig. 7. Finite element model for ACOS

명하여 점진적 파손해석에 적용하기가 쉬운 최대 응력식[15]을 사용하였다. Tsai-Wu 파손식[15]과 같이 파손모드 간 연계를 고려할 수 있는 식이 있지만 모드의 구분이 용이하지 않아 점진적 파손해석에 적용하기 곤란하다.

해석의 정확성을 위해 가능한 실제 시험조건에 가깝게 모델링하였고, 특히 플렌지와 복합재 원통이 만나는 부분이 좌굴 압력에 영향을 미치기 때문에 실제 플렌지의 두께와 재질 및 경계조건을 유한요소해석에 그대로 반영하였다. Fig. 7에서와 같이 우단의 경우 플렌지 전체를 모델링하여 특별한 경계조건이 불필요하고, 좌단은 수압 시험기에 고정되므로 고정 경계조건을 사용하였다. 두께 공칭치수는 모든 시편에서 8 mm로 동일하지만 실제 제작과정에서의 차이로 인해 각 원통 별로 치수가 조금씩 다르다. 따라서 해석 시에 각 원통 별로 실측한 두께를 사용하였다.

IV. 결과 및 분석

4.1 좌굴압력 및 형상

시험에서 좌굴압력은 원통에서 파손을 동반한 대변형이 발생하는 순간의 외부 압력으로 정의하였다. 헬리컬 와인딩만으로 제작된 $[\pm 60]_{FW}$ 원통의 경우 시험에서 평균 좌굴압력이 7.7 MPa이었다. 해석에서는 NASTRAN 선형해석의 경우 7.95 MPa로 약 3.2%의 차이를 보이고 있다. MARC에 의한 비선형해석에서는 7.93 MPa로 그 차이가 약간 줄어들었고, ACOS에서는 7.83 MPa로 1.7% 차이를 보이고 있다. $[\pm 30/90]_{FW}$ 의 경우 수압시험 결과와 비교할 때 NASTRAN 15.3%, MARC 14.9%, ACOS 14.3%의 차이를 보인다. $[\pm 60/90]_{FW}$ 에서는 NASTRAN 7.7%, MARC 9.2%, ACOS 5.7%의 차이를 보이며 ACOS가 시험값에 가장 가깝고 보수적인 좌굴압력을 예측하였다. 하지만 $[\pm 45/90]_{FW}$ 에서는 NASTRAN 8.8%,

Table 3. Test and analysis results

ID	Stacking Sequence	Thickness (mm)	Hoop thickness (mm)	Buckling Pressure (MPa)			
				Test	Nastran (Error, %)	Marc (Error, %)	ACOS (Error, %)
FWT61	[±60] _{FW}	8.237	-	8.04	8.29 (3.1%)	8.28 (3.0%)	8.12 (0.9%)
FWT62		7.969	-	7.36	7.60 (3.2%)	7.57 (2.9%)	7.54 (2.5%)
Average		8.103	-	7.70	7.95 (3.2%)	7.93 (2.9%)	7.83 (1.7%)
FWT301	[±30/90] _{FW}	8.010	1.429	4.30	4.78 (11.1%)	4.78 (11.1%)	4.73 (10.1%)
FWT302		8.003	1.362	4.40	4.80 (9.1%)	4.79 (8.9%)	4.77 (8.4%)
FWT303		8.007	1.611	3.80	4.71 (24.1%)	4.70 (23.8%)	4.67 (22.9%)
FWT304		8.007	1.518	4.01	4.75 (18.4%)	4.69 (17.1%)	4.70 (17.3%)
Average		8.007	1.480	4.13	4.76 (15.3%)	4.74 (14.9%)	4.72 (14.3%)
FWT451		8.123	0.971	5.80	6.02 (3.7%)	5.88 (1.4%)	6.12 (5.5%)
FWT452	[±45/90] _{FW}	8.126	1.038	5.62	6.03 (7.2%)	5.89 (4.8%)	6.12 (8.9%)
FWT453		8.135	0.966	5.47	6.04 (10.4%)	5.90 (7.9%)	6.14 (12.2%)
FWT454		8.253	0.985	5.50	6.27 (13.9%)	6.18 (12.3%)	6.36 (15.6%)
Average		8.159	0.990	5.60	6.06 (8.8%)	5.96 (6.6%)	6.18 (10.5%)
FWT601	[±60/90] _{FW}	7.801	0.984	7.18	7.56 (5.3%)	7.66 (6.7%)	7.44 (3.6%)
FWT602		7.832	0.950	6.97	7.64 (9.6%)	7.74 (11.0%)	7.52 (7.8%)
FWT603		7.790	1.029	7.33	7.54 (2.9%)	7.68 (4.7%)	7.38 (0.7%)
FWT604		7.986	1.053	7.14	8.06 (12.9%)	8.15 (14.2%)	7.92 (10.9%)
Average		7.852	1.004	7.16	7.70 (7.7%)	7.81 (9.2%)	7.56 (5.7%)

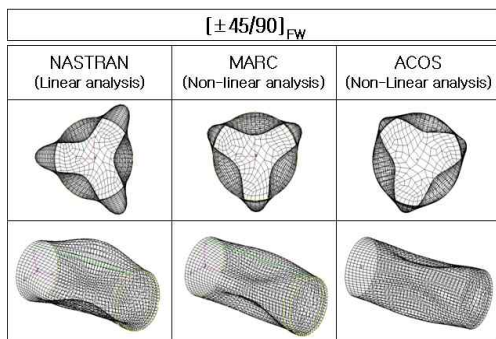


Fig. 8. Buckling modes of [±45/90] composite cylinder

MARC 6.6%, ACOS 10.5%의 차이를 보이며 MARC가 시험값과 가장 잘 일치하였다. Table 3에 원통의 실측 두께와 실험 및 해석 좌굴압력을 나타내었다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 [±60]_{FW}, [±30/90]_{FW}, [±45/90]_{FW}, [±60/90]_{FW} 모두 원주방향으로 3개의 웨이브를 지나는 좌굴모드를 보인다. 길이방향으로는 하나의 웨이브만 나타난다.

4.2 축방향 변위

수압 시험용 원통 모델의 축방향 변위 측정을 위해 원통의 플렌지 중앙에 LVDT를 설치하였다. 그러나 원통이 좌굴을 일으킬 때 좌굴과 동시에 파손이 발생하면서 원통 속으로 물이 쏟아져 들어와 LVDT가 파손되는 현상이 발생하였다. 이로 인해 좌굴압력에 도달하기 전에 LVDT를 제거하여, 해석 결과와의 비교 혹은 좌굴의 판단기준으로 LVDT 결과를 사용하지 않았다. Fig. 9에 헬리컬 와인딩 각도가 60도인 원통에 대해 좌굴이 발생하기 전까지의 축방향 변위를 나타내었다. 시험에서 축방향 변위는 좌굴압력에 가까워질수록 비선형성을 보이며 ACOS의 해석에서 이를 비교적 잘 묘사하고 있다. LVDT에서 측정되는 변위는 플렌지 자체의 처짐도 포함된 것이므로 그림의 비선형성이 반드시 복합재 원통의 축방향 변형의 비선형성을 의미하는 것은 아니다.

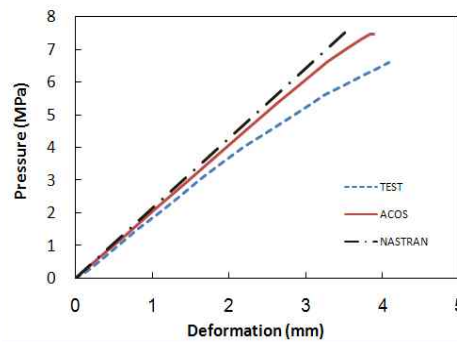


Fig. 9. Typical pressure vs. end-shortening curve of a cylinder (FWT603)

4.3 좌굴 후 거동

ACOS 파손해석 결과 모든 원통에서 초기좌굴 모드는 원주방향으로 세 개의 웨이브를 보이는 형태이다. [±30/90]_{FW}, [±45/90]_{FW} 경우 최종 파손에 도달할 때까지 세 개의 웨이브를 유지하며 파손이 진행되었다. 시험에서는 Fig. 10에서 보인

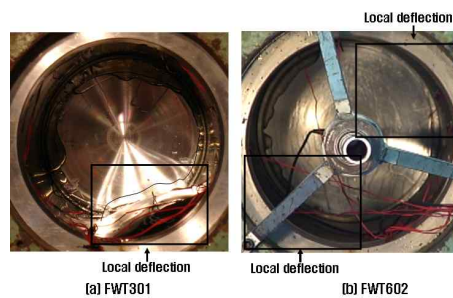


Fig. 10. Typical buckling mode shapes

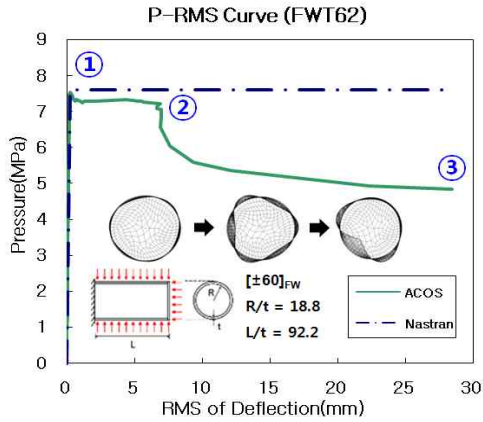


Fig. 11. Pressure-deflection curve of $[\pm 60]_{FW}$ composite cylinder

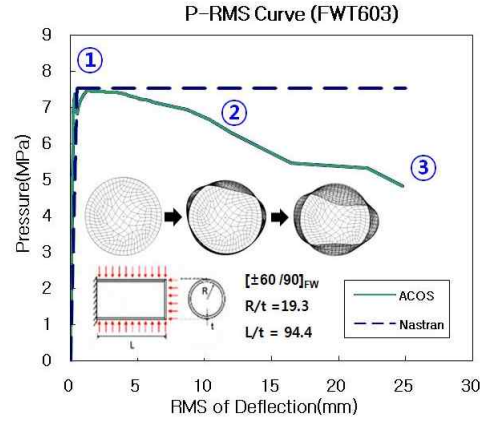


Fig. 14. Pressure-deflection curve of $[\pm 60/90]_{FW}$ composite cylinder

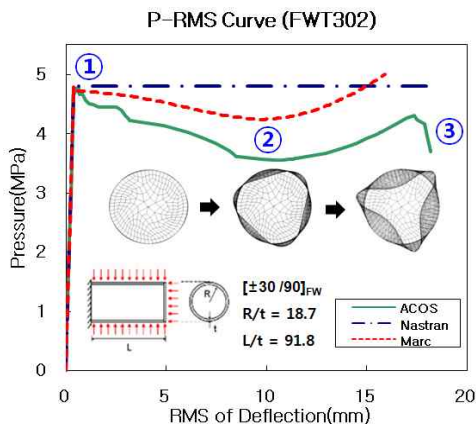


Fig. 12. Pressure-deflection curve of $[\pm 30/90]_{FW}$ composite cylinder

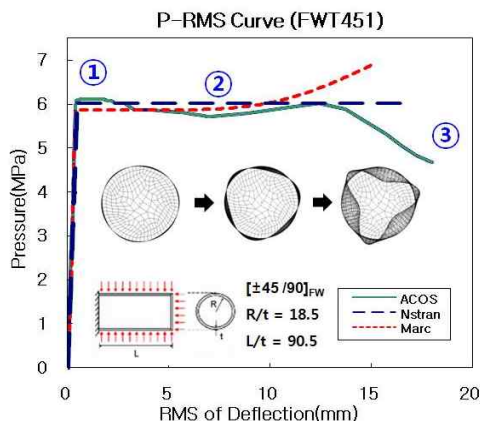


Fig. 13. Pressure-deflection curve of $[\pm 45/90]_{FW}$ composite cylinder

것과 같이 국부적인 변형을 보이며 파손되었다. 이것은 원통의 부분적인 두께 차이와 같은 기하학적, 재료적 초기 결함으로 인한 것으로 볼 수 있다. 그러나 $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 60/90]_{FW}$ 는 좌굴 전에 국부적인 기지손상이 예측되었고, 좌굴 후 변형이 진행되면서, 좌굴모드가 변하는 현상이 예측되었고, 시험에서도 동일한 현상이 관찰되었다.

Fig. 11~14는 헬리컬 와인딩 각도별로 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 원통의 좌굴에서 어느 지점의 변위 값을 잡는가에 따라 하중-변위 곡선의 모양이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 모든 절점에서 처짐 값의 평균 즉 RMS(Root Mean Square) 값을 사용하였다. 원주방향 좌굴 형상의 변화를 ①, ②, ③ 지점에서 나타내었다.

$[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 60/90]_{FW}$ 에 대한 MARC의 해석에서는 좌굴 후 수렴성이 좋지 않아 ACOS의 결과만을 표시하였다. NASTRAN 선형해석에서는 좌굴하중만을 구할 수 있다. MARC의 경우 비선형 해석이지만 좌굴 후 발생하는 구조물의 손상을 고려하지 못하였기 때문에 ACOS와 비교할 때 좌굴 후 지지하중을 과대평가하고 있다. 반면에 ACOS는 좌굴 후 구조물의 손상에 의한 강성저하를 고려하고 있기 때문에 좌굴 후 변형과 손상이 진행됨에 따라 지지하중이 급격하게 감소하고 있다. MARC의 경우 좌굴 직후 지지하중이 감소하다가 다시 회복하는 경향을 보이는 반면 좌굴 후 손상을 고려한 ACOS 해석에서는 좌굴이 발생한 후에는 다시 좌굴압력 수준의 하중을 회복하지 못하고 최종파손에 도달하는 것을 알 수 있고, 이는 실제 수압시험에서와 동일한 결과이다.

①, ②, ③ 지점의 ACOS 해석 파손 진행 양상을 Fig. 15~18에 제시하였다. 각 층의 요소별 파

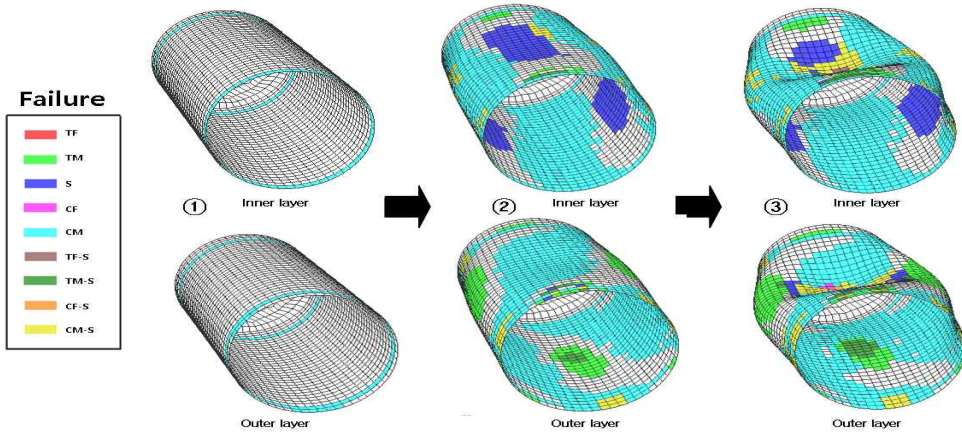


Fig. 15. Failure of $[\pm 60]_{FW}$ composite cylinder

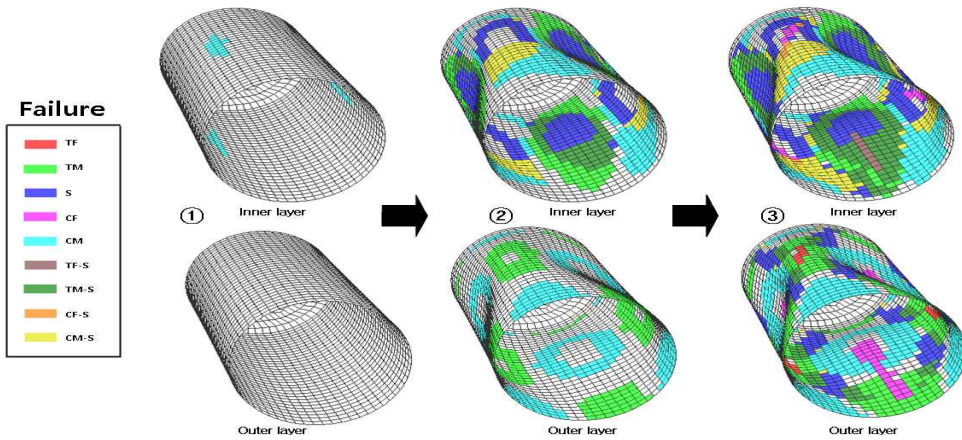


Fig. 16. Failure of $[\pm 30/90]_{FW}$ composite cylinder

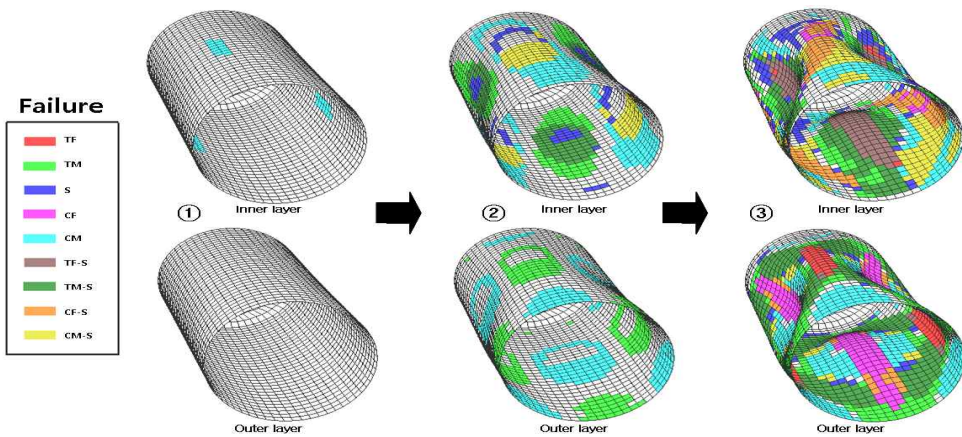


Fig. 17. Failure of $[\pm 45/90]_{FW}$ composite cylinder

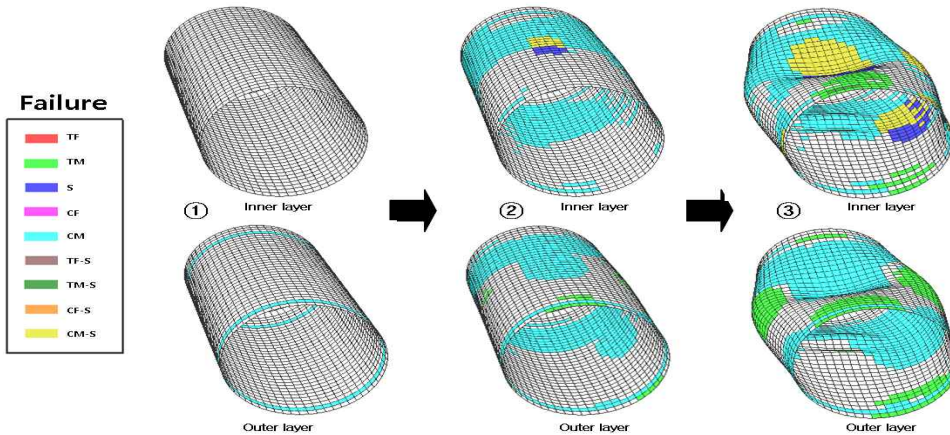


Fig. 18. Failure of $[\pm 60/90]_{FW}$ composite cylinder

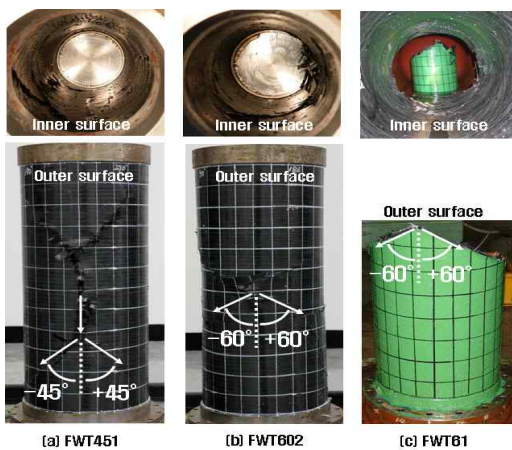


Fig. 19. Failure of composite cylinders (test)

손모드에서 TF는 섬유 인장파손, TM은 기지의 인장파손, S는 전단파손, CF는 섬유의 압축파손, CM은 기지의 압축파손을 나타낸다. $[\pm 60]_{FW}$ 와 $[\pm 60/90]_{FW}$ 의 파손은 플랜지 부분에서 기지파손이 시작되어 원통의 종축을 따라 중앙 부분에서 집중적으로 섬유파손이 발생한다. $[\pm 30/90]_{FW}$, $[\pm 45/90]_{FW}$ 의 경우 종축의 가운데 부분에서 기지파손이 시작되어 종축방향으로부터 원통 전체로 파손이 발생하는 것을 볼 수 있다.

시험에서도 동일한 현상을 관찰할 수 있는데, Fig. 19는 $[\pm 45/90]_{FW}$, $[\pm 60/90]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$ 의 시험에서 최종파손 양상을 보인 것이다. 양쪽 경계 근처에서는 플랜지에 의한 구속으로 처짐의 크기가 작다. 따라서 파손은 섬유의 방향을 따라 종축으로부터 헬리컬 와인딩 각도인 $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$ 로 발생한다. 그러나 원통의 중심부 즉 처짐의 값이

큰 영역에서는 굽힘 모멘트의 효과가 커지게 되고, 후프 와인딩 층이 큰 응력을 받게 된다. 따라서 후프 와인딩 층의 섬유가 끊어지면서 종축방향으로 파손이 진행되는 것을 볼 수 있다. $[\pm 60/90]_{FW}$ 의 경우 $[\pm 45/90]_{FW}$ 보다 종축방향 파손의 진행 범위가 작은 것을 볼 수 있다. $[\pm 45/90]_{FW}$ 의 경우 $[\pm 60/90]_{FW}$ 보다 횡축으로의 하중지지가 약하므로 더 큰 처짐을 가지게 되는 것을 이유로 볼 수 있다. $[\pm 60]_{FW}$ 와 $[\pm 60/90]_{FW}$ 의 좌굴하중은 7% 내외로 비슷하지만 파손 모드는 매우 다른 것을 볼 수 있다. $[\pm 60]_{FW}$ 의 경우 원통이 파괴되면서 절단되는 반면에 $[\pm 60/90]_{FW}$ 에서는 후프층과 헬리컬층의 파손이 혼합되면서 원통 전체가 절단되는 현상은 발생하지 않는다.

V. 결 론

본 연구에서는 쉘의 비선형 좌굴해석 프로그램인 ACOS를 이용하여 필라멘트 와인딩 후판 복합재에 대한 좌굴 및 파손 해석을 수행하였다. 유한요소해석의 타당성을 검증하기 위해 복합재 원통을 필라멘트 와인딩으로 제작하고 수압시험을 수행하였다. 또한 상용 유한요소 프로그램인 MSC.NASTRAN, MSC.MARC를 사용하여 ACOS 결과와 비교하였다. ACOS를 이용한 비선형해석의 결과는 좌굴압력에서 실험결과와 1.7 ~ 14.3%의 오차를 보이며 상용 유한요소 프로그램과 유사하거나 보다 더 잘 일치하였다. 본 연구를 통해 파손 판정법과 파손으로 인한 강성저하를 적절히 고려한 ACOS의 비선형 해석은 필라멘트 와인딩 원통의 좌굴압력을 잘 예측할 수 있음을 확인하였다. 시험에서 헬리컬 와인딩만 사용한

원통의 경우 좌굴 후 원통이 완전히 절단되는 급격한 파손을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 모든 층을 동일한 헬리컬 와인딩만으로 제작하는 것보다 후프 와인딩 층을 같이 사용해야 하고, 가능하다면 헬리컬 와인딩 층도 $\pm 45^\circ \sim 60^\circ$ 의 두 가지 이상의 패턴을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지정 수중운동체 특화연구센터와 한국학술진흥재단 중점연구소 지원사업(KRF-2008-005-J01001)의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- 1) C. T. F. Ross, "A Conceptual Design of an Underwater Vehicle", *Ocean Engineering*, Vol. 33, 2006, pp. 2087-2104
- 2) C. S. Smith, "Design of Submersible Pressure Hulls in Composite Materials", *Marine Structures* Vol. 4, 1991, pp. 141-182
- 3) V. Carvelli, N. Panzeri, C. Poggi, "Buckling strength of GFRP under-water vehicles", *Composites*, Vol. 32, 2001, pp.89-101
- 4) 정태환, 이종무, 홍석원, 김진봉, 안진우, "복합재 반자율 무인잠수정(SAUV)의 내압선체 설계, 구조해석 및 내압시험 결과에 관한 검토", *한국해양공학회지*, 제18권 2004, pp. 52-58
- 5) S. W. Gong, K. Y. Lam, "Transient Response of Stiffened Composite Submersible Hull Subjected Underwater Explosive Shock", *Composite Structures*, Vol. 41, 1998, pp. 27-37
- 6) A. V. Bray, A. Rick, C. S. Nichols, "Development of a Filament Wound Composite Radiating Shell for an Underwater Acoustic

Transducer", *Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center RDT&E Division San Diego, CA 92152-5000*

- 7) C.-C. Liang, H.-W. Chen, C.-Y. Jen, "Optimum Design of Filament-wound Multilayer-sandwich Submersible Pressure Hulls", *Ocean Engineering*, Vol. 30, 2003, pp. 1941-1967
- 8) D. Graham, "Buckling of Thick-section Composite Pressure Hulls", *Composite Structures*, Vol. 35, 1996, pp. 5-20
- 9) T. Nishiwaki, A. Yokoyama, Z. Maekawa, H. Hamada, S. Mori, "A Quasi-three-dimensional Lateral Compressive Analysis Method for a Composite Cylinder", *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 293-298
- 10) D. Graham, "Composite Pressure Hulls for Deep Ocean Submersibles," *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 331-343
- 11) S. H. Hur, H. J. Son, J. H. Kweon, J. H. Choi "Postbuckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure" *Composite Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 114-124
- 12) J. H. Kweon, "Crippling analysis of composite stringers based on complete unloading method", *Computers and Structures*, Vol. 80, 2002, pp. 2167-2175
- 13) J. H. Kweon, C. S. Hong, I. C. Lee, "Postbuckling Compressive Strength of Graphite/Epoxy Laminated Cylindrical Panels Loaded in Compression", *AIAA Journal*, Vol. 33, 1995, pp. 217-222
- 14) S. C. Chou, O. Orringer, J. H. Rainey, "Post-failure Behavior of Laminates. I-No Stress Concentration", *Journal of Composite Materials*, 1976, Vol. 10, pp. 371-381
- 15) R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials" *Tayer & Franics*, New York, 1999