

수압을 받는 복합재 원통의 최종강도 실험 연구

조상래* · 김현수* · 구정본* · 조종래** · 권진희*** · 최진호***

*울산대학교 조선해양공학부

**해양대학교 기계정보공학과

***경상대학교 기계항공공학부

Experimental Study on the Ultimate Strength of Composite Cylinders under Hydrostatic Pressure

SANG-RAI CHO*, HYUN-SU KIM*, JEONG-BON KOO*, JONG-RAE CHO**, JIN-HWE KWON*** AND JIN-HO CHOI***

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan Univ., Ulsan, Korea

**Dept. of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea

***School of Mechanical and Aerospace Engineering, Kyung-Sang Univ., Jinju, Korea

KEY WORDS: Composite cylinder 복합재 원통, Ultimate strength 최종강도, Initial imperfection 초기 결함, Isotropic material 등방재, Hydrostatic pressure test 수압실험

ABSTRACT: Composite material is one of the strongest candidates for deep sea pressure hulls. Research regarding composite cylinders, subjected to hydrostatic pressure, has been ongoing for a couple of decades, abroad, but domestic research is very new. Experimental investigations seem necessary, in order to understand their structural behavior not only up to the ultimate limit state, but in the post-ultimate regime. That experimental information will be very helpful in the development of any theoretical methods or to substantiate any commercial numerical packages for structural analyses. In this study, ultimate strength tests on seven composite cylinders subjected to hydrostatic pressure are reported, which includes the fabrication method of models, mechanical properties of the material, initial shape imperfection measurements, test procedure, and strain and axial shortening measurements during the tests. The ultimate strengths of the models were compared with predictions of numerical analyses. The numerical predictions are higher than the test results. It seems necessary to improve the accuracy of the numerical predictions by considering the initial shape and material imperfections.

1. 서 론

복합재는 고심도 내압선체의 재료로 사용하기에 많은 장점을 가지고 있다(Smith, 1990; Graham, 1995). 하지만 국내에서는 아직까지 고심도 복합재 구조물에 대한 연구가 거의 진행되어 있지 않다. 최근 KRISO에서 수행한 연구(정태환 등, 2003)가 거의 유일하지 않나 판단된다. 이와 같이 새로운 분야의 연구를 위해서는 관련 실험연구가 선행되어야 한다. 이와 관련하여 외국에서는 오래 동안 많은 연구가 축적되어 있지만 실험연구의 자세한 결과는 그리 많지 않으며 Stabuck and Blake(1994), Andersen et al.(1994)과 Messenger et al.(2002)이 복합재 원통이 수압을 받는 경우의 실험연구 결과를 발표한 바 있다.

고심도 복합재 내압구조물의 해석법 개발을 위해서는 한 교신저자 김현수: 울산시 남구 무거2동

052-259-2838 mantop@mail.ulsan.ac.kr

두 개의 모델에 대한 실험으로는 불충분하고 여러 설계변수를 바꾸어 가면서 다양한 모델에 대한 실험연구를 수행해야 한다.

이런 과정을 통해 구조거동에 대한 특성을 잘 이해할 수 있을 뿐만 아니라 수압을 받는 복합재 구조물 거동의 이론적인 추정에 대한 신뢰도를 확보할 수 있다. 이번 실험연구에서는 7개의 실험모델에 대하여 수압실험을 수행하여, 구조물의 변위, 응력 등을 계측하였고 최종강도 이후까지 진행하며 강도를 측정하였다.

본 실험에서는 등방체의 최종강도실험 방법과 측정기법(조상래 등, 2000; 조상래 등, 2002)을 복합재의 최종강도실험에 활용하여 수행하였다. 등방재료의 구조물을 위해 개발한 최종강도 추정식과 유사한 형태를 갖는 설계식의 유도 가능성 파악하기 위해 수압을 받는 축소모델에 대한 최종강도실험은 복합재 구조물의 붕괴거동을 파악하고, 상업용 프로그램과 독자적으로 개발한 강도해석 프로그램의 정확도와 신뢰성을 검증할 실험자료 확보하는 것이 목적이다.

2. 실험 장치

2.1 압력용기

본 실험에는 Fig. 1에서 보여주는 압력용기를 사용하였다. 이 압력용기는 최대 150기압(1500m의 수심에 해당)까지 실험이 가능하며 수용할 수 있는 실험모델의 크기는 650mm(D)x1500mm(L)이다. 주로 원통형 외압구조물의 붕괴 강도 실험에 사용되며, 이미 강구조의 보강원통이나 보강 원추통의 실험연구에 사용된 바 있다.

기본 작동은 압력용기에 실험모델을 설치한 다음 핸드펌프로 서서히 수압을 가하여 외압을 받는 원통구조물의 거동을 규명할 수 있다. 모델에 작용하는 압력은 핸드펌프에 부착되어 있는 1개와 Chamber 자체에 부착되어 있는 1개의 아날로그 계측기와, Chamber에 따로 연결하는 디지털 압력 계측기를 이용하여 측정할 수 있다.

2.2 슈퍼 볼트와 고압 핸드 펌프

압력용기의 완벽한 수밀을 위하여 Fig. 2와 같은 슈퍼 볼트를 사용하였다.

또한 압력용기 내의 압력을 높이기 위해 수동 고압펌프(최대 압력: 50MPa)로 물을 주입하였다(Fig. 3).

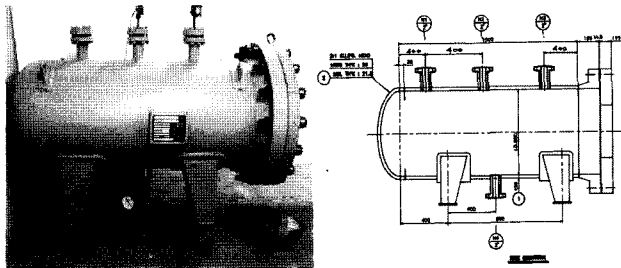


Fig. 1 Pressure chamber

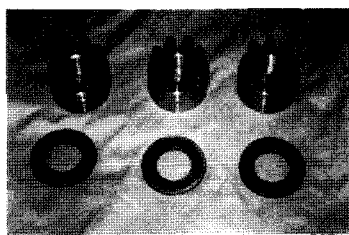


Fig. 2 Super bolt

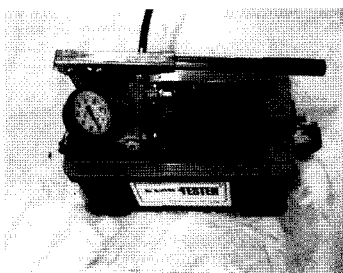


Fig. 3 Hand pump

2.3 측정 장치

실험 중 각 부위의 변형을 측정하기 위하여 두 가지 측정 장치를 사용하였다. 복합재 원통 끝단에 End point의 변위를 측정하는 데에는 LVDT 하나를 설치하여 이 측정값을 증폭기를 통하여 전기적 값으로 받고, 90도 간격의 Bay 5에서의 Strain 변화 값은 해당 위치에 Strain gauge를 붙여 LabView를 이용하여 컴퓨터에서 data로 출력하도록 하였다(Fig. 4 참조).

정확한 압력의 측정을 위하여 디지털 압력 측정기(최대 측정압력: 2MPa)를 사용하였다(Fig. 5).

2.4 수압실험방법

핸드 펌프로 압력을 제어하면서 축 변위와 스트레인 변화 값을 측정하였다. 최종강도 이후에도 물을 계속 주입하였으며, 복합재의 최대변형 이후에는 수압을 단계적으로 낮추어 실험모델의 재귀거동을 살펴보았다.

실험 중 계측한 변위와 변형률은 Fig. 6의 절차에 따라 수치자료로 획득하였다.

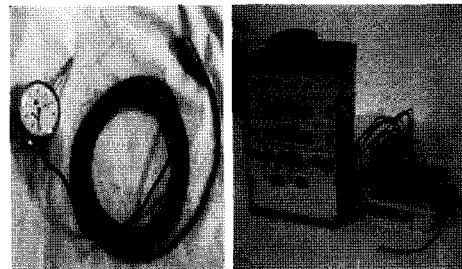


Fig. 4 Measuring instruments

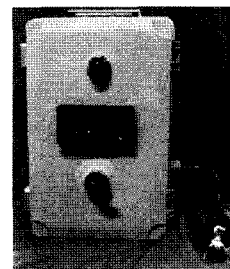


Fig. 5 Digital pressure gage

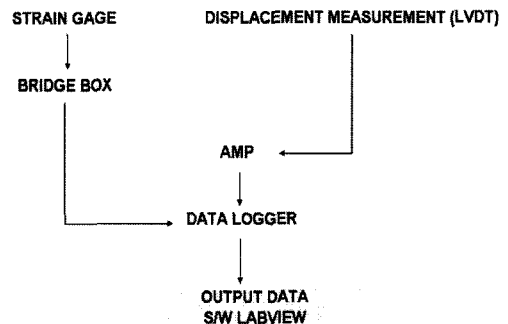


Fig. 6 Data acquisition process

3. 실험 모델

본 연구에서는 모두 일곱 개의 복합재 모델에 대한 실험을 수행하였다. 두 개의 모델(CP-1, CP-2)은 USN125 Carbon/Epoxy prepreg 두께 0.110mm 적층순서 [0/90]_{4S} 16층으로, 그리고 나머지 다섯 개의 모델(CP-3, CP-4, CP-5, CP-6 과 CP-7)은 USN125 Carbon/Epoxy prepreg 두께 0.105mm 적층순서 [0/90]_{12T}에 24층으로 적층하여 수압실험을 하였다. 앞의 두 모델은 각 층별로 섬유를 잘라 제작하였고, 나머지 다섯 모델을 섬유를 자르지 않고 연속적으로 적층하였다.

3.1 모델의 크기 및 재료특성

모델의 크기는 Table 1에서 보이고 있다. 복합재 모델의 시편에 대하여 재료적 특성은 Table 2에 정리하였다.

모델의 제작방법은 Vacuum bag molding process를 이용하여, 수공으로 작업하였다. 그로인하여 각 복합재 모델의 표면에는 주름이 많이 있었으며, 정확한 원통이 아닌 초기의 변형이 있었다.

Table 1 Dimensions of models

Model	Height (mm)	Thickness (mm)	Measured outside radius (mm)
CP-1	550	1.76	160.14
CP-2	550	1.76	159.89
CP-3	563	2.52	160.61
CP-4	569	2.52	160.44
CP-5	600	2.69	160.68
CP-6	600	2.69	160.70
CP-7	600	2.64	160.70

*Note: Outside radius of the mold is 158 mm.

Table 2 Material properties of models

Property	Symbol	Value		Unit
		CP-1,2	CP-3,4,5,6,7	
Thickness per ply	T	0.110	0.105	mm
Elastic modulus	E_1	131	162	GPa
	$E_2 = E_3$	8.2	9.6	
Poisson's ratio	$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.281	0.298	-
	ν_{23}	0.47	0.47	
Shear modulus	$G_{12} = G_{13}$	4.5	6.1	GPa
	G_{23}	3.5	3.5	
Tensile strength	X_T	2000	2652	MPa
	$Y_T = Z_T$	60	43	
Laying method	-	[0/90] _{4S} 16 layers	[0/90] _{12T} 24 layers	-

3.2 Grid 작업

원주 방향 15도 간격, 길이 방향 10등분하여 Fig. 7에서 보여주는 것과 같은 Grid를 그렸다.

3.3 Strain gage의 부착 위치

Strain gage는 각 실험 모델의 길이방향 중앙부인 Bay 5에서 0도, 90도, 180도, 270도에 각각 원주방향과 길이방향으로 2 개씩 총 8 개를 부착하였다.

3.4 초기 변형 측정

Turn table 방식을 이용해 모델 당 216(24x9)개의 점에 대한 초기 변형을 측정하여, 각 Bay에서 이들이 진원으로부터 벗어난 정도를 보이고 초기 형상 결함을 수식화하였다.

Fig. 8에서 실선은 Fourier 급수로 근사화한 것인데 진원에

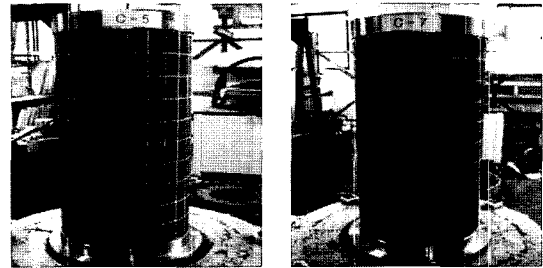


Fig. 7 Gridded models

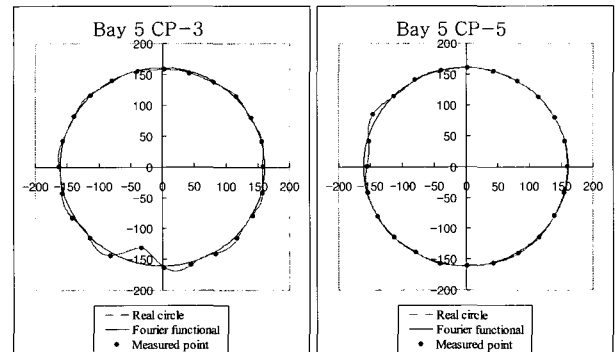


Fig. 8 Initial shape imperfection

Table 3 Results of initial shape imperfection measurement

Model	Max. out-of-roundness (w_i/R_o)	Out-of-roundness at mid-length (bay 5) (w_i/R_o)
CP-1	-0.81% (bay 4, 0°)	-0.22% (150°)
CP-2	-0.26% (bay 1, 45°)	-0.07% (0°)
CP-3	-1.58% (bay 5, 255°)	-1.58% (255°)
CP-4	-0.21% (bay 5, 75°)	-0.21% (75°)
CP-5	0.53% (bay 1, 60°)	0.52% (150°)
CP-6	-2.16% (bay 5, 330°)	-2.16% (330°)
CP-7	4.92% (bay 1, 300°)	-0.56% (0°)

서 벗어난 정도를 10배 증폭시켜 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 수식으로 근사화한 경우 약간의 오차는 보이나 대체적으로 원통의 초기 형상을 잘 나타내고 있다.

Table 3에 최대 진원도가 나타나는 계측값을 정리하였다. Bay 번호는 모델의 플랜지 쪽부터 End point 쪽으로 부여한 것이며, w_b 는 초기 형상변형 값이고 R은 각 Bay에서의 반지름이다.

4. 실험 결과

4.1 Model CP-1

수압실험 중 복합재-플랜지 이음부에 누수가 발생하여 보수 작업을 수행하여 재실험한 결과, CP-1은 0.17MPa을 최대압력으로 90도와 180도 사이에서 1차, 180도와 270도 사이에서 2차 변형이 발생하였다. 180도와 270도 사이에서는 변형이 커지다가 누수현상이 발생하였다.

4.2 Model CP-2

CP-2의 경우, 0.2 MPa에서 더 이상 압력이 올라가지 않고,

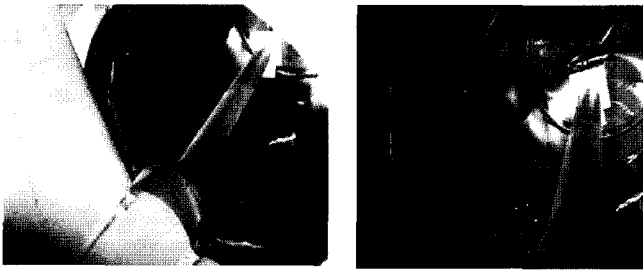
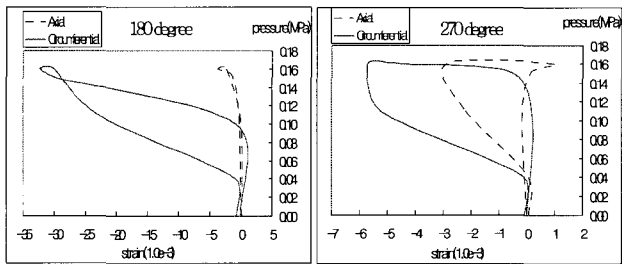


Fig. 9 Inside deformation of model CP-1



(a) Strain at 180° (b) Strain at 270°

Fig. 10 Measurement results of model CP-1

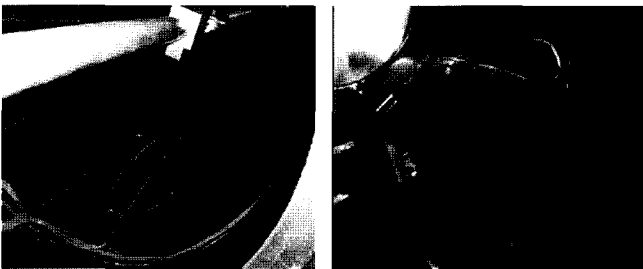


Fig. 11 Inside deformation of model CP-2

90도와 180도 사이에서 1차 변형 후 사라지고, 0도 부근에서 2차 변형이 발생하면서 물이 새어나왔다.

4.3 Model CP-3

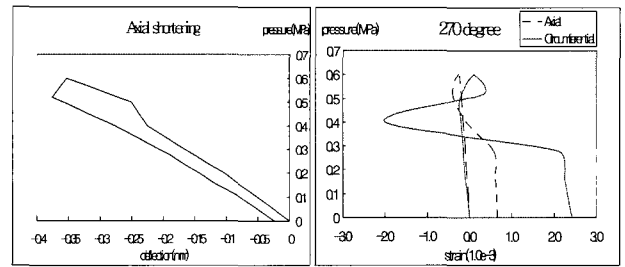
CP-3은 최대 압력 0.6MPa 이후, 270도 근처에서 1차 변형, 180도와 270도 사이에서는 2차 변형이 나타나면서 복합재와 플랜지 접합부에서 물이 새었다.

4.4 Model CP-4

CP-4의 경우에도 CP-1과 마찬가지로 보수작업 후 재실험하였으나, 0.51MPa에서 더 이상 압력이 오르지 않았다. 변형은 보이지 않았으나 Strain이 급격히 커지기 시작하였고, 계속 가압하자 180도 부근에서 순간적인 변형이 일어났다가 물이 새기 시작하면서 변형은 곧바로 사라지고 Crack의 흔적만 남아있음을 확인하였다.

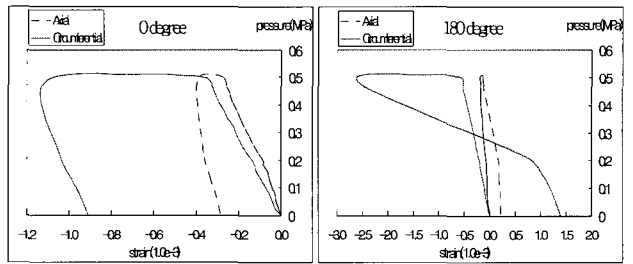
4.5 Model CP-5

CP-5는 0.56MPa이 최대 압력이었고, 0도 중앙부에서 1차



(a) Axial shortening (b) Strain at 270°

Fig. 12 Measurement results of model CP-3



(a) Strain at 0° (b) Strain at 180°

Fig. 13 Measurement results of model CP-4



Fig. 14 Inside deformation of model CP-5

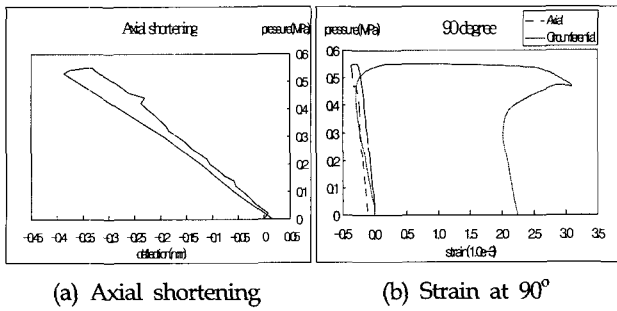


Fig. 15 Measurement results of model CP-5

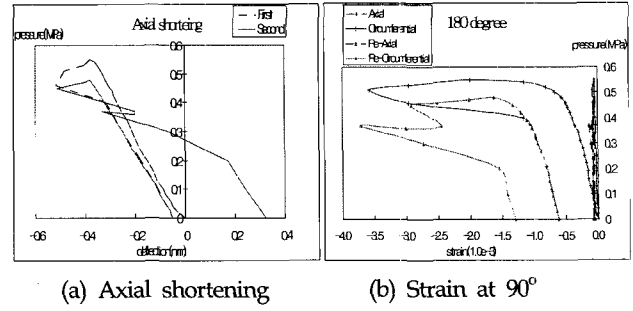


Fig. 19 Measurement results of model CP-7



Fig. 16 Inside deformation of model CP-6

Table 3 Results of hydrostatic pressure tests

Model	Ultimate state pressure		Ratio $(P_c)_{exp.} / (P_c)_{pred.}$
	Numerical prediction $(P_c)_{pred.}$ [MPa]	Experimental result $(P_c)_{exp.}$ [MPa]	
CP-1	0.24	0.17	0.71
CP-2	0.24	0.20	0.83
CP-3	0.69	0.60	0.87
CP-4	0.68	0.51	0.75
CP-5	0.65	0.55	0.85
CP-6	0.65	0.55	0.85
CP-7	0.65	0.55	0.85

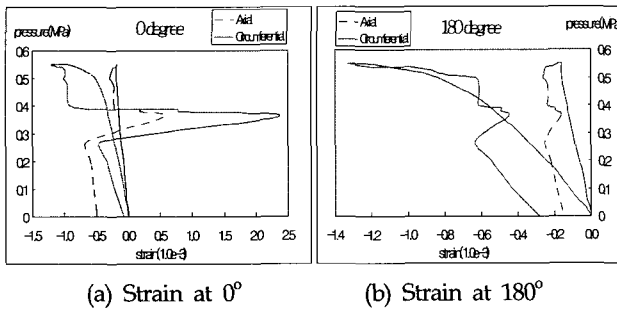


Fig. 17 Measurement results of model CP-6

4.7 Model CP-7

0.55MPa까지 압력이 올라갔다. 이후, 120도 중앙부에서 변형이 시작되었고, 300도 부근과 함께 전체적인 함몰이 발생하였다.

0.0MPa까지 단계적으로 감압 후 재 가압하였는데, 0.48MPa에서 이전과 동일 위치에서 변형이 시작된 후, 325도 부근에서는 급격한 변형이 발생하였다.

5. 결 론

복합재 원통의 초기 형상 결함을 측정하고, 최종강도를 수압실험을 통해 구하여 이를 상용 프로그램인 MARC를 이용한 수치해석 값(손희진 등, 2006)과 비교하였다.

CP-1과 CP-4의 경우는 복합재-플랜지 이음부의 결함으로 인한 누수로 보수 후 재실험한 결과로 다른 모델들에 비해 더 낮은 Ratio 값을 보이고 있다.

본 연구로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다

(1) 7개의 복합재 원통에 대한 수압시험을 수행하고 모델의 최종강도 뿐만 아니라 최종강도 이후의 거동을 성공적으로 규명하였다.

(2) 제작된 모델의 초기 형상 결함(Initial shape imperfection)은 턴테이블 방식의 장치를 사용하여 계측하였고 계측된 값은 Fourier series로 수식화하였다. 초기 형상 결함은 대체로 End plate 부근(Bay 1)과 길이의 중앙부(Bay 5) 근처에서 최대값을 보이고 있다. 용접으로 제작하는 구조물의 경우는 반지름의 0.5%까지 초기변형을 허용하고 있는데 복합재의 경우는 아직 초기형상 결함의 허용치가 잘 알려져 있지 않다. 본 연구에서

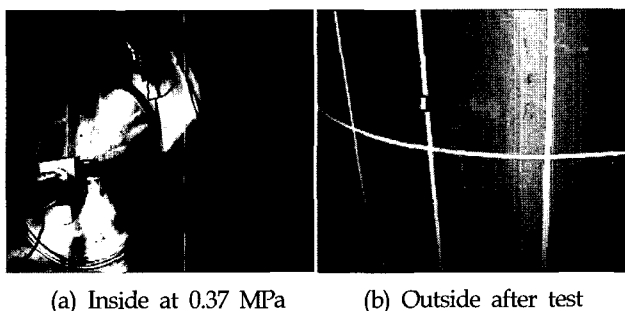


Fig. 18 Deformation of model CP-7

변형이 일어났다. 2차 변형은 100도 부근에서 발생하였다. 이후, 100도 부근에서 Crack 발생하고 260도 부근에서는 큰 변형이 발생하며 물이 새었다.

4.6 Model CP-6

0.55MPa에서 더 이상 압력이 증가하지 않고 0도 부근에서 넓게 변형을 보였고, 복합재-플랜지 접합부에서는 누수현상이 발생하였다.

사용한 모델의 초기변형은 최대 2.16%를 나타내었다.

(3) 실험 방법이나 계측은 등방체의 것과 거의 동일한데 초기에는 추정 붕괴압력의 5% 정도씩 압력을 증가하였고 추정 붕괴압력의 50% 이상의 범위에서는 2% 정도씩 압력을 증가하였다. 최종강도 이후도 물을 더 주입하여 최종강도 이후의 거동을 살펴보았다.

(4) 7개의 모델에 대해 수치해석으로 추정된 최종강도가 실험결과보다 평균적으로 18.6% 정도 과대평가함을 알 수 있었다. 또한 최종강도 이후에 상당한 값의 잔류강도를 보유했으며, 탄성 대 변형이 발생하여 수압을 제거하면 거의 원래의 형상으로 복귀함을 확인할 수 있었다.

(5) 수치해석에 의한 최종강도의 추정값이 실험결과보다 큰 이유로는 다음을 들 수 있다.

- 층의 박리(주름)
- 재료의 불균일성
- 초기 형상 결함(Initial shape imperfection)

위의 주요 요인들이 최종강도에 미치는 영향을 규명하여 이론적인 추정값의 정확도를 개선할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 수중운동체 특화센터(UVRC)의 연구비를 지원받아 수행되었다.

참 고 문 헌

- 손희진, 권진희, 최진호, 조종래, 조상래 (2006). "수압을 받는 복합재 원통의 좌굴해석", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 부산, pp 52-58.
- 정태환, 이종무, 홍석원, 안진우, 김태욱, 김진봉 (2003). "복합재 반자율 무인잠수정 (SAUV)의 내압선체 설계, 구조해석 및 내압시험 결과에 관한 검토", 한국해양공학학회

지, 제18권, 제4호, pp 52-58.

조상래, 김승민, 김형주 (2000). "원환보강원통의 최종강도실험연구", 대한조선학회 추계학술대회 논문집 울산대, 울산, pp 314-319.

조상래, 김승민, 소하영, 장영식, 박진수, 김국빈 (2002). "수압을 받는 원환보강 원추통의 최종강도 실험연구", 대한조선학회 추계학술대회 논문집 부산, pp 315-318.

Andersen, S.M., Gillespie, J.W. JR, Lamontia, M.A., Olson, B.D., Sloan, J.G., Newman, K.E. and Kodokian, G.K.A. (1994). "Design, Analysis, and Hydrotesting of a Composite-Aluminum Cylinder Joint for Pressure-Hull Applications", Compression Response of Composite Structures, ASTM STP 1185, S.E. Groves and A.L. Highsmith, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 97-112.

Graham, D. (1995). "Composite Pressure Hulls for Deep Ocean Submersibles", Composite Structures, Vol 32, pp 331-343.

Messenger, T., Pyrz, M., Gineste, B. and Chauchot, P. (2002). "Optimal Laminations of Thin Underwater Composite Cylindrical Vessels", Composite Structures, Vol 58, pp 529-537.

Smith, C.S. (1990). Design of Marine Structures in Composite Materials, Elsevier Applied Science, London, chap 4, pp 287.

Starbuck, J.M. and Blake, W.H. (1994). "Failure of Thick Composite Cylinders Subjected to External Hydrostatic Pressure", Compression Response of Composite Structures, ASTM STP 1185, S.E. Groves and A.L. Highsmith, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 159-174.

2007년 1월 16일 원고 접수

2007년 5월 16일 최종 수정본 채택