

## 수압을 받는 복합재 원통의 최종강도 실험 연구

조상래\* · 김현수\* · 구정본\* · 조종래\*\* · 권진회\*\*\* · 최진호\*\*\*

\*울산대학교 조선해양공학부

\*\*해양대학교 기계정보공학과

\*\*\*경상대학교 기계항공공학부

### Experimental Study on the Ultimate Strength of Composite Cylinder 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 Uni., Ulsan, Korea

\*\*Dept. of Mechanical and Information Engineering Korea Maritime Uni., Pusan, Korea

\*\*\*School of Mechanical and Aerospace Engineering Kyung-Sang Uni., 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 strong candidates for deep sea pressure hulls. Research regarding composite unstiffened or stiffened cylinders subjected to hydrostatic pressure has a couple of decades history abroad but domestic research is very new. Experimental investigations seem necessary to understand their structural behavior not only up to the ultimate limit state but in post-ultimate regime. Those experimental information will be very helpful to develop 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, material 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 those of numerical analyses. The numerical predictions are higher than the test results. It is necessary to improve the accuracy of the numerical predictions.

## 1. 서 론

국내에서는 아직까지 고심도 복합재 구조물에 대한 연구가 거의 진행되어 있지 않다. 최근 KRISO에서 수행한 연구가 거의 유일하지 않나 판단된다. 이와 같이 새로운 분야의 연구를 위해서는 관련 실험연구가 선행되어야 한다. 물론 외국에서는 오래 동안 많은 연구가 축적되어 있지만 실험연구의 자세한 결과는 거의 발표되지 않고 있다.

고심도 복합재 내압구조물의 해석법 개발을 위해서는 관련 실험연구가 동반되어야 한다. 이런 실험연구도 한 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 5개의 실험모델에 대하여 수압실험을 수행하여, 구조물의

변위, 응력 등을 계측하였고 최종강도 이후까지 진행하며 강도를 측정하였다.

본 실험에서는 등방체의 최종강도실험 방법과 측정기법을 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.1 에서 보여주는 압력용기를 사용하였다. 이 압력용기는 최대 150기압(1500m의 수심)까지 실험이 가능하며 실험모델의 최대 크기는 650mm(D) x 1500mm(L)이다.

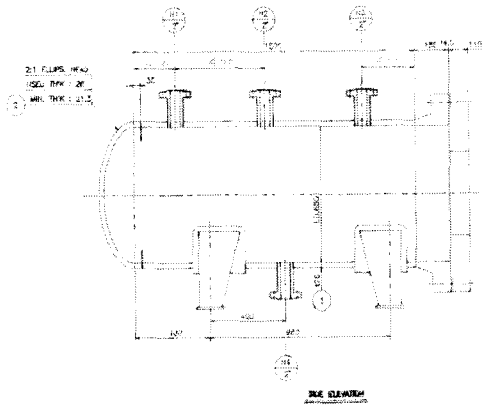


Fig. 1 Pressure Chamber

### 2.2 슈퍼 볼트

압력용기의 완벽한 수밀을 위하여 슈퍼 볼트를 사용하였다.

### 2.3 고압 핸드 펌프

압력용기 내의 압력을 높이기 위해 수동 고압펌프(최대 압력:500bar)로 물을 주입하였다.

### 2.4 변형 측정 장치

실험 중 각 부위의 변위를 측정하기 위하여 복합재 원통 끝단에 End Point의 변위를 측정하기 위한 LVDT 하나와 90도 간격의 bay 5에 strain gage를 설치하였다.

### 2.5 압력 측정 장치

정확한 압력의 측정을 위하여 디지털 압력 측정기(최대 계측 압력:20bar)를 사용하였다.

실험 Data를 얻는 방식을 Data Flow Chart로 나타내었다.

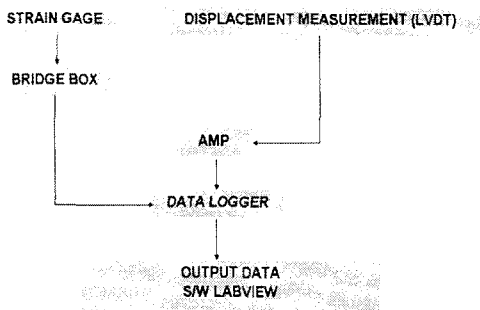


Fig. 2 Data Flow Chart

### 2.6 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.

## 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]<sub>16</sub> 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]<sub>12T</sub> 에 24층으로 적층하여 수압실험을 하였다. 앞의 두 모델은 각 층별로 섬유를 잘라 제작하였고, 나머지 다섯 모델을 섬유를 자르지 않고 연속적으로 적층하였다.

### 3.1 모델의 제원 및 특징

Table 1. Dimensions of Models

Model	Height (mm)	Thickness (mm)	Inside Radius (mm)	Measured Outside Radius (mm)
CP-1	550	1.76	158	160.14
CP-2	550	1.76	158	159.89
CP-3	563	2.52	158	160.61
CP-4	569	2.52	158	160.44
CP-5	600	2.69	158	160.68
CP-6	600	2.69	158	160.70
CP-7	600	2.64	158	160.70

각 복합재 모델의 표면에는 주름이 많이 있었으며, 정확한 원통이 아닌 초기의 변형이 있었다.

### 3.2 Grid 작업

원주 방향 15도 간격, 길이 방향 10등분하여 grid를 넣었다.

### 3.3 Strain gage의 부착 위치

Strain gage는 각 실험 모델의 Bay 5에서 0도, 90도, 180도, 270도에 각각 원주방향과 길이방향으로 두 개씩 부착하였다.

### 3.4 초기 변형 측정

Turn Table 방식을 이용해 216(24x9)개의 측정 점에 대한 초기 변형을 측정하여, 각 Bay에서 이들이 진원으로부터 벗어난 정도를 보이고 초기 형상 결함을 수식화하였다 [Fig. 3].

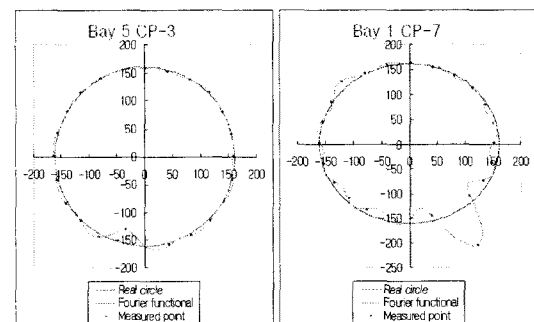


Fig. 3 Initial imperfection

Table 2 Results of initial imperfection measurement

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

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 Model CP-1

CP-1은 1.7 bar를 최대압력으로 90도와 180도 사이에서 1차, 180도와 270도 사이에서 2차 변형이 발생하였다. 180도와 270도 사이에서는 변형이 커지다가 누수현상이 발생하였다.

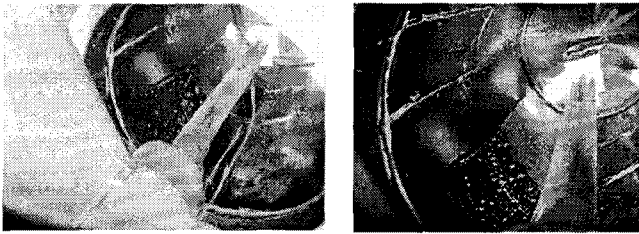


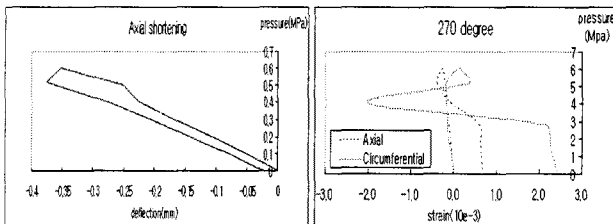
Fig. 4 Inside deformation of CP-1

##### 4.2 Model CP-2

CP-2의 경우, 2.0 bar에서 더 이상 압력이 올라가지 않고, 90도와 180도 사이에서 1차 변형 후 사라지고, 0도 부근에서 2차 변형이 발생하면서 물이 새어나왔다.

##### 4.3 Model CP-3

CP-3은 최대 압력 6.0 bar 이후, 270도 근처에서 1차 변형, 180도와 270도 사이에서는 2차 변형이 나타나면서 복합재와 플랜지 접합부에서 물이 새었다.

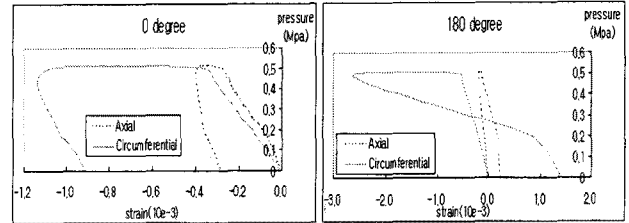


(a) Axial shortening (b) Strain graph at 270°

Fig. 5 Measurement result of CP-3

##### 4.4 Model CP-4

CP-4의 경우에는 5.1 bar 에서 더 이상 압력이 오르지 않았다. 변형은 보이지 않았으나 strain이 급격히 커지기 시작하였고, 계속 가압하자 180도 부근에서 순간적인 변형이 일어났다 가 물이 새기 시작하면서 변형은 곧바로 사라지고 crack의 흔적만 남아있음을 확인하였다.



(a) Strain graph at 0° (b) Strain graph at 180°

Fig. 6 Measurement result of CP-4

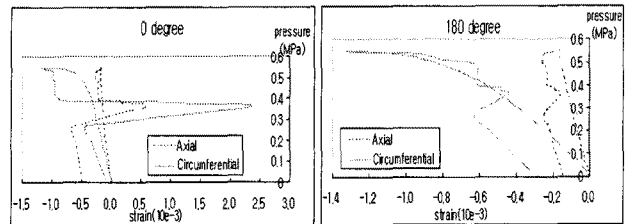
##### 4.5 Model CP-5

CP-5는 5.6 bar가 최대 압력이었고, 0도 중앙부에서 1차 변형이 일어났다. 2차 변형은 100도 부근에서 발생하였다.

이후, 100도 부근에서 crack 발생하고 260도 부근에서는 큰 변형이 발생하며 물이 새었다.

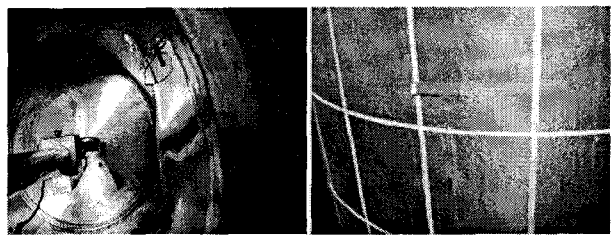
##### 4.6 Model CP-6

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



(a) Strain graph at 0° (b) Strain graph at 180°

Fig. 7 Measurement result of CP-6



(a) Inside at 3.7 bar (b) Outside after Exp.

Fig. 8 Deformation of CP-7

##### 4.7 Model CP-7

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

0.0 bar까지 단계적으로 감압 후 재 가압하였는데, 4.8 bar에서

이전과 동일 위치에서 변형이 시작된 후, 325도 부근에서는 급격한 변형이 발생하였다.

### 5. 수치해석결과와 실험결과의 비교

Table 3 Results of Hydrostatic Pressure Tests

Model	Ultimate state Pressure		Ratio
	Numerical Prediction [N/mm <sup>2</sup> ]	Experimental Result [N/mm <sup>2</sup> ]	
CP-1	0.24	0.16	0.67
CP-2	0.24	0.20	0.83
CP-3	0.72	0.60	0.84
CP-4	0.71	0.51	0.72
CP-5	0.68	0.55	0.82
CP-6	0.65	0.55	0.85
CP-7	0.68	0.55	0.82

### 6. 검토 및 결론

복합재 원통의 초기 형상 결함을 측정하고, 최종강도를 수압 실험을 통해 구하여 이를 기존의 수치해석에 의한 값과 비교하였다. 본 실험의 결론은 다음과 같다.

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

(2) 제작된 모델의 초기 형상 결함(initial shape imperfection)은 테이블 방식의 장치를 사용하여 계측하였고 계측된 값은 Fourier Series로 수식화하였다. 초기 형상 결함은 대체로 end plate 부근(bay 1)과 길이의 중앙부(bay 5) 근처에서 최대 값을 보이고 있다. 용접으로 제작하는 구조물의 경우는 반지름의 0.5%까지 초기변형을 허용하고 있는데 복합재의 경우는 아직 초기형상 결함의 허용치가 잘 알려져 있지 않다.

(3) 실험 방법이나 계측은 등방체의 것도 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 20.8% 정도 과대평가함을 알 수 있었다. 또한 최종강도 이후에 상당한 값의 잔류강도를 보유함을 확인할 수 있었다. 수치해석에 의한 최종강도의 추정값이 실험결과보다 큰 이유로는 다음을 들 수 있다.

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

위의 주요 원인들로 인한 해석 추정 값과 실험 데이터

값의 차이를 분석하고 규명해야 할 필요가 있다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

정태환, 이종무, 홍석원, 안진우, 김태욱, 김진봉 (2003). “복합재 반자율 무인잠수정 (SAUV)의 내압선체 설계 및 구조해석”, 선박해양기술, 제35호, pp 45-51.

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.

Bonanni, D.L. (1994). “Stability Analysis of Thick-Section Composite Cylinders Under Hydrostatic Pressure Including Three-Dimensional Effects and Nonlinear Material Response”, in *Compression Response of composite Structures*, ASTM STP 1185, S. E. Groves and A. L. Highsmith, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 7-33.

Greene, E. (1990). “Use of Fiber Reinforced Plastics in the Marine Industry”, Shp Structure Committee Report, SSC-360.

Henton, D. (1967). Glass reinforced plastics in the Royal Navy, Trans. RINA, 109.

Pecknold, D.A. and Rahman, S. (1994). “Application of a New Micromechanics-Based Homogenization Technique for Nonlinear Compression of Thick-Section Laminates”, in *Compression Response of composite Structures*, ASTM STP 1185, S. E. Groves and A. L. Highsmith, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 34-54.

Silvergleit, M.J., Kaminetsky, J. and Fried, N. (1967). “Filament Wound Glass Reinforced Plastics for Deep Sea Vehicles - the Present State of the Art”, Society of Aerospace materials and Process Engineers.

Starbuck, J.M., Blake, W.H. (1994). “Failure of Thick Composite Cylinders Subjected to External Hydrostatic Pressure”, in *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.

Tucker, J.S. (1979). “Glass Reinforced Plastic Submersibles”, Trans. NEC Inst. Engrs & Shipbuilders, Vol 95, No 2.