

# 탄소섬유강화플라스틱 재료 레저선박의 구조강도 평가를 위한 시험설비 구축과 운용에 관한 연구

정한구<sup>1</sup>·장양<sup>2</sup>·염덕준<sup>†</sup>  
군산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
로동대학교 울산조선해양학원<sup>2</sup>

## The Development of Structural Test Facility for the Strength Assessment of CFRP Marine Leisure Boat

Han Koo Jeong<sup>1</sup>·Yang Zhang<sup>1,2</sup>·Deuk Joon Yum<sup>1,†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University<sup>1</sup>  
Ulsan Ship and Ocean College, LuDong University<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper deals with the development of structural test facility for the strength assessment of marine leisure boat built from carbon fiber reinforced plastics (CFRP) materials. The structural test facility consists of test jig, load application and control system, and data acquisition system. Test jig, and load application and control system are designed to accommodate various size and short span to depth ratios of single skin, top-hat stiffened and sandwich constructions in plated structural format such as square and rectangular shapes. A lateral pressure load, typical and important applied load condition to the plates of the hull structure for marine leisure boat, is simulated by employing a number of hydraulic cylinders operated automatically and manually. To examine and operate the structural test facility, five carbon/epoxy based FRP square plates having the test section area of 1 m<sup>2</sup>, which are part of CFRP marine leisure boat hull, are prepared and they are subjected to monotonically increasing lateral pressure loads. In the test preparation, considering the symmetry of the plates geometry, various strain gauges and linear variable displacement transformer are used in conjunction with data acquisition system utilizing LabVIEW. From the test observation, the responses of the CFRP hull structure of marine leisure boat are understood by obtaining load to deflection and strain to load curves.

**Keywords** : CFRP materials(탄소섬유강화플라스틱 재료), Data acquisition system(데이터 수집 장치), Lateral pressure load(횡하중), Linear variable displacement transformer(선형가변위치센서), Marine leisure boat(레저선박), Strain gauge(스트레인 게이지), Strength assessment(강도평가), Structural test facility(구조시험설비)

## 1. 서론

금속 재료에 비해 높은 내열성, 우수한 비강도 및 비강성 그리고 경량성 등을 갖는 탄소섬유강화플라스틱(이하 CFRP) 재료는 1950년대부터 우주산업 분야에 적용되기 시작하여 항공산업, 자동차산업, 스포츠산업 분야 등으로 적용 범위가 점진적으로 확대되어 왔다. 상대적으로 뒤늦게 CFRP 재료가 적용된 레저선박 분야의 경우 초기에는 선체 일부분에 국한하여 CFRP 재료를 사용

하였으나, 레저선박에 있어서 중요한 설계 목적인 우수한 재료 성질, 내부식성과 경량성에 대한 끊임 없는 요구가, 최근 들어 증가하고 있는 CFRP 재료의 수요에 따른 제조 공법의 발전에 기인한 가격 하락과 합쳐져 이제는 CFRP 재료가 선체 전체로 확대되어 적용되는 사례를 어렵지 않게 찾아 볼 수 있게 되었다. 현재 전 세계적으로 CFRP 재료의 핵심인 탄소섬유는 매 5년마다 생산량이 2배씩 증가하는 추세를 보이고 있으며, 이로부터 지속적인 탄소섬유의 가격 하락이 예측되고 있다. 더불어 레저선박의 건조에 활용이 용이한 다양한 직조된 형태의 탄소섬유 제품 종류

가 증가하고 있어, 해가 갈수록 레저선박에서의 CFRP 재료 쓰임은 증가할 것으로 예측하고 있다.

일반적으로 섬유강화플라스틱(이하 FRP) 재료를 기반으로 한 판 구조물은 강화 섬유(reinforced fiber)와 상대적으로 낮은 탄성 계수 값을 갖는 수지(resin)를 혼용하여 제작되며, 여기서 강화 섬유는 각 플라이(ply) 내에 무방향 혹은 양방향 내지는 특정한 방향으로 정렬 배치된다. 레저선박에 적용되고 있는 FRP 재료 기반 판 구조물은 방향성을 가지는 직조된 형태의 강화 섬유 제품을 사용하여 제작하며 이는 선체에 작용하는 대표적인 하중으로써 대 변형을 유발시키는 횡 하중을 받게 된다 (Shenoi & Wellicome, 1993).

이와 같은, FRP 재료를 사용한 판 구조물을 갖는 레저선박의 구조설계 및 강도 평가를 위해서 다양한 연구가 수행되었으며 그 중 일부를 소개하면 다음과 같다. Shin, et al. (2006) 등은 FRP 샌드위치 구조방식을 가정한 소형 레저요트의 구조설계 절차와 구조해석 기법을 제시하고 유한요소해석을 통해 전선 강도 평가를 수행하였다. FRP 재료로 제작된 카타마란형 레저요트에 대해서도 구조설계 절차를 제시한 연구가 Park, et al. (2009) 등에 의해 수행되었다. 해당 연구에서는 레저요트에 적용 가능한 선급 규정을 정리하여 구조설계에 활용될 수 있는 기초자료로 제시하였으며 유한요소법을 이용하여 전선해석을 통한 강도 평가를 수행하였다. Ji, et al. (2010) 등은 40피트급 FRP 레저요트의 전선 구조해석을 통해 구조 취약부인 선수부, 마스트, 마스트 연결부의 국부강도 평가를 수행함과 아울러 로이드 선급의 Special Service Craft 규정 (LR, 2009)과 한국 선급의 소형경구조선 규칙 (KR, 2008)을 이용한 결과에 대해 비교 및 검토 연구를 수행하였다. 한편, CFRP 재료를 이용한 레저선박에 대한 관련 연구도 최근에 수행되었는데, Oh, et al. (2014) 등은 CFRP 재료를 기반으로 한 레저선박에 대해 ISO 12215 (ISO, 2008)과 RINA의 Pleasure Yacht Part B (RINA, 2009) 규정을 각각 사용하여 선체설계를 진행하였으며 그 결과를 비교 분석하였다. Seo, et al. (2015) 등은 33피트급 아메리카스 컵 훈련용 CFRP 쌍동형 세일링 요트 개발을 목표로 CFRP 재료를 기반으로 한 세일링 요트의 선체 형상 및 마스트 설계 및 개발에 대한 연구와 함께 제작 방법에 대해서도 논의하였다.

위의 문헌조사를 통해서, FRP 재료를 사용한 광의의 레저선박과 관련된 선행 연구들은 구조설계의 절차 제시, 관련된 선급 규정의 비교 및 검토 그리고 유한요소해석 수행을 통한 전선 강도 평가 내용이 주를 이루고 있는 것을 알 수 있다. FRP 재료 기반의 선체 구조물은 재료의 이방성과 이종 재료의 혼용으로 인해 복잡한 파괴모드 (Agarwal & Broutman, 1990)를 갖는다. 또한 동일한 강화 섬유라 하더라도 직조된 형태와, 다른 종류의 수지와와의 조합에 따라 매우 상이한 구조적 응답성을 보인다. 이러한 특성을 고려했을 때 시험을 통한 선체 구조 강도 평가는 선행 연구에서 제시된 구조설계 절차를 보완하고 해석적 강도 평가 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 필수적인 내용이라고 판단된다.

이런 측면에서, 본 논문에서는 CFRP 재료를 사용한 레저선박의 보다 효율적인 구조설계를 위해, 실제 레저선박을 위해 제작

된 판 구조물에 대한 강도 평가를 수행할 목적으로 시험설비를 구축하고 이를 활용하여 강도 평가를 수행한 결과를 다루고 있다.

## 2. CFRP 재료 기반의 레저선박

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 고려한 CFRP 재료를 사용하여 제작된 레저선박을 보여주고 있다. 선체는 다축(multi-axial)과 수직(satin)의 형태로 직조된 탄소섬유와 에폭시 수지(epoxy resin)를 조합한 CFRP 재료를 사용하여 제작하였다. 최대 12명까지 승선이 가능한 본 레저선박의 개략적인 제원을 Table 1에 소개하였다.



Fig. 1 Picture of CFRP marine leisure boat

Table 1 Specification of CFRP marine leisure boat

	Specification
Overall length	15m
Maximum number of passenger	12
Weight of hull	10tonnes
Maximum speed	32Knot

## 3. 구조강도 평가를 위한 시험설비

CFRP 재료 기반의 레저선박 선체 구조물의 시험적 강도평가를 위해 시험설비를 구축하였다. 시험설비는 구조시험 프레임, 하중 부가 장치 그리고 계측센서 및 데이터 수집 장치 등으로 구성이 되었으며 각각에 대한 설명은 아래와 같다.

### 3.1 구조시험 프레임

레저선박의 모노코크(monocoque) 구조방식, 샌드위치(sandwich) 구조방식 그리고 톱햇보강재(top-hat stiffener)로 보강된 구조방식 등을 채용한 다양한 선체구조물을 고려하여 구조 시험 프레임을 설계하였다. 강철을 사용한 구조시험 프레임은 상기 선체구조 방식들로부터 취해진 판 구조물의 강도 평가와 변형을 측정을 위해 다음의 조건들을 만족하도록 제작되었다.

- 1) 기본 시험용 판 구조물은 시험면적 1.0의 길이 대 폭 비를 가지며 이때 길이와 폭은 각각 1 m이다;
- 2) 시험용 판 구조물은 최대 1.5의 길이 대 폭 비를 가진다. 따라서 폭 1 m에 대해서 길이를 1.5 m까지 조정할 수 있다;
- 3) 구조시험 프레임에 적용할 수 있는 시험용 판 구조물의 두께는 보강재의 높이를 제외하고 최대 50 mm가 되도록 한다;
- 4) 선체에 작용하는 횡 하중을 묘사하기 위해 시험용 판 구조물의 외판 면에 수직하게 분포하중이 작용되게 하며, 이를 위해 복수의 유압 실린더가 시험용 판 구조물의 길이 방향으로 이동 및 임의의 위치에 견고히 고정될 수 있도록 한다;
- 5) 선체로부터 시험용 판 구조물을 가져온 상황을 고려하여 구조시험 프레임에 장착되는 시험용 판 구조물의 사변 경계조건은 고정조건이 되도록 한다.

Fig. 2은 위 조건들을 만족시키는 구조시험 프레임의 평면도를 보여주고 있다. 시험용 판 구조물의 고정 경계 조건을 구현하기 위한 부분까지 고려하면 구조시험 프레임의 전체 크기는 폭이 1.4 m, 길이는 1.9 m이다. 길이 대 폭 비 1.0의 최소 시험면적인 1 m<sup>2</sup>을 갖는 시험용 판 구조물의 경우 실제 크기는 길이가 1.4 m, 폭이 1.4 m가 되며, 최대 길이 대 폭 비인 1.5를 갖는 시험면적이 1.5 m<sup>2</sup>인 시험용 판 구조물은 길이가 1.9 m, 폭이 1.4 m가 된다.

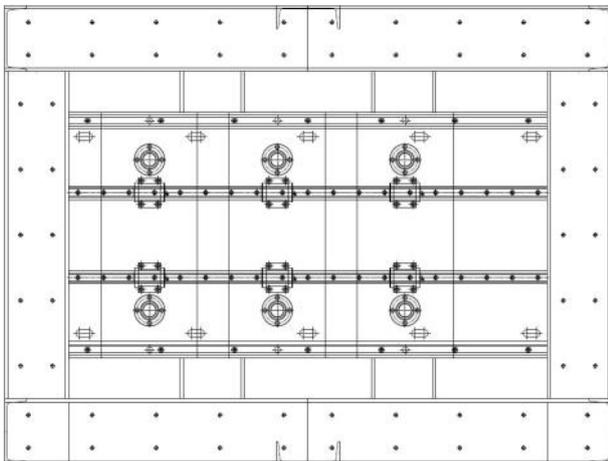


Fig. 2 Plan view of structural test rig

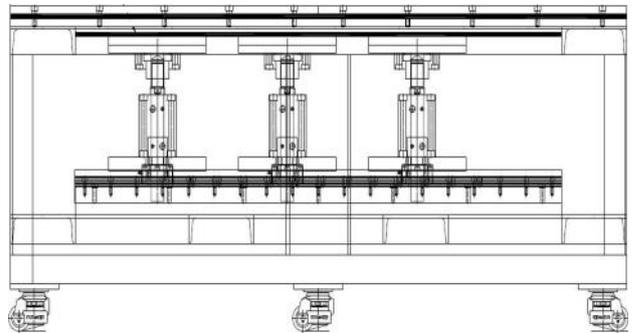
고정 경계 조건을 구현하기 위해 구조시험 프레임의 사변으로 각각 0.2 m의 폭에 총 60개의 직경 12 mm 볼트를 사용하여 시험용 판 구조물이 구조시험 프레임에 견고히 고정될 수 있도록 하였다. Fig. 2에서 사변 테두리 쪽에 보이는 점들이 볼트를 보여주고 있으며, 중앙부의 원형은 유압 실린더를 나타내고 있다.

### 3.2 하중 부가 시스템

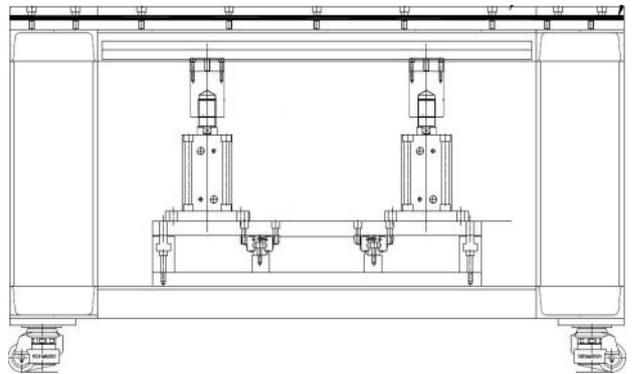
시험용 판 구조물의 시험 면적을 고려하여 외판 면에 수직하게 작용하는 분포하중을 부가할 목적으로 총 6개의 유압 실린더

를 Fig. 3과 Fig. 4에 보이는 바와 같이 배치하였다. 이들은 서로 다른 시험용 판 구조물의 길이 대 폭 비 값들을 고려하여 분포하중을 부가하고자 구조시험 프레임 하단에 설치된 가이드 레일을 통해 이동과 고정이 가능하도록 하였다. 동시에 동기화를 이루어 동일한 하중이 외판 면에 작용되도록 하였다. 이들 유압 실린더를 사용하여 시험용 판 구조물에 가할 수 있는 최대 분포하중의 크기는 150 bar이며, 하중 부가는 매뉴얼 부가 방식과 계획된 부가하중 시나리오에 따라 프로그램에 의해 자동적으로 부가되는 방식을 모두 가능케 하였다.

Fig. 3는 구조시험 프레임에 장착된 유압 실린더 배치의 측면도(3-a)와 정면도(3-b)를 보여주고 있다 : 구조시험 프레임의 길이 방향으로 쌍으로 3열 배치 그리고 폭 방향으로 쌍으로 2열 배치를 하였다.



(a) Side view of hydraulic cylinders installed



(b) Front view of hydraulic cylinders installed

Fig. 3 Layout of the installation of hydraulic cylinders

Fig. 4는 구조시험 프레임에 정착된 유압 실린더의 배치 사진을 보여주고 있으며 여기서, 각각의 유압 실린더 상단에 로드 셀(load cell)을 설치하여 유압모터 게이지에서 가리키는 하중 값과 유압실린더를 통해 시험용 판 구조물에 작용되는 하중 값을 비교함으로써 부가 하중의 정확성을 검증하고자 하였다.

6개의 유압 실린더로부터 전달되는 하중을 시험용 판 구조물에 분포하중으로 작용시키기 위해 로드 셀 상단에 시험 면적과 동일한 면적을 갖는 강판을 두었으며 아울러 이 강판과 시험용 판 구조물 사이에 역시 시험 면적과 동일한 면적을 갖는 고무판을 두어 하중 작용 시 시험용 판 구조물에 발생할 수 있는 응력 집중 현상을 피하였다.

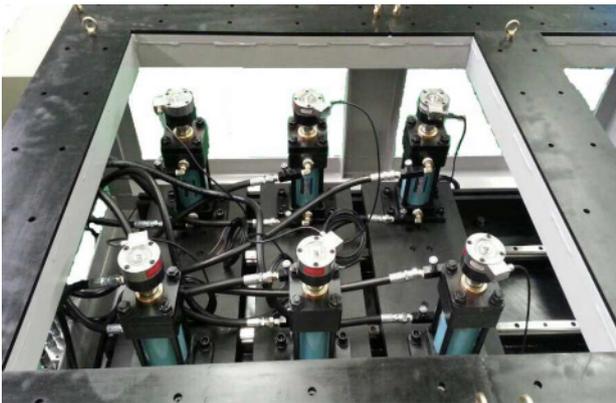


Fig. 4 Arrangement of multiple hydraulic cylinders with load cell devices attached

### 3.3 계측센서 및 데이터 수집 장치

외부 하중을 받는 구조시험 프레임에 고정된 시험용 판 구조물의 강도를 평가하고 변형을 측정하기 위해서 CFRP 재료 특성을 고려한 스트레인 게이지(strain gauge)와 선형가변위치센서(LVDT, Linear Variable Displacement Transformer) 그리고 National Instruments (NI, 2016)사의 데이터 수집 장치를 사용하였다.

복합재료의 이방성 특성으로 인한 방향성에 따른 상이한 구조 응답성을 계측하기 위해 1축(uni-axial)과 3축(rossette)의 스트레인 게이지를 혼용하였다. 사용된 1축과 3축 게이지는 각각 6.35 mm와 1.57 mm의 게이지 길이를 가지며 공통적으로  $350 \pm 0.6\%$  Ohms 저항과  $-50^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$  범위의 운용온도를 가지고 있다. 선형가변위치센서의 경우, 구조시험 프레임에 적용할 수 있는 시험용 판 구조물의 최대 두께에 여유치를 추가하여 최대 100 mm 범위까지 측정이 가능하도록 하였다. 시험용 판 구조물의 경계조건이 사변 고정인 관계로 선형가변위치센서를 판 구조물의 중앙에 설치하여 최대 처짐을 계측하도록 하였다. 데이터 수집 장치는 NI사의 PXI와 SCXI 시스템을 사용하였으며 시험에 사용되는 스트레인 게이지 수와 선형가변위치센서 그리고 6개의 유압 실린더 상단에 부착된 로드 셀 등을 고려하여 총 24채널로 구성하였다. 아울러 계측센서가 추가될 경우를 대비하여 SCXI 시스템을 활용하여 추가 채널을 확보하도록 하였다. 한편 시험으로부터 수집되는 계측센서 데이터는 LabView 소프트웨어를 기반으로 한 프로그램을 사용하여 제어 및 취득하였다.

## 4. 시험용 CFRP 적층판 구조물

본 연구를 통해 구축된 시험설비를 활용하여 레저선박 선체 구조물의 강도평가를 수행하기 위해, 대상으로 삼은 레저선박(Fig. 1 참조)의 선체에 사용된 판 구조물과 동일한 재료, 적층 설계 안 그리고 제작 공법을 사용한 총 5개의 CFRP 시험용 판 구조물을 활용하였다. 이 판 구조물은  $600 \text{ g/m}^2$ 의 Multi-axial과

$400 \text{ g/m}^2$ 의 Satin의 형태로 직조된 탄소섬유에(Fig. 5 참조) 부분적으로 로빙 매트(roving mat)를 적층하였으며, 에폭시 수지를 사용하였다. 제작 공법은 수적층과 진공압축을 동시에 사용하여 적층된 각 플라이 간에 우수한 함침이 이루어지도록 하였다.

Table 2는 5개의 CFRP 시험용 판 구조물의 크기를 보여주고 있다. 시험면적이  $1 \text{ m}^2$ 인 판 구조물을 고려한 관계로 약간의 편차는 있으나 길이와 폭이 모두 1.4m 이상이 되도록 하였다. 다만 두께의 경우 최대 15.4 mm에서 최소 13.4 mm까지의 차이를 보이고 있는데 이는 제작공법에 수적층이 포함되어 발생한 것으로 판단된다.



(a) Multi-axial 00,  $\pm 450$  ( $600 \text{ g/m}^2$ )



(b) Satin ( $400 \text{ g/m}^2$ )

Fig. 5 Carbon fabrics used for laminated plated structure

Table 2 Size of test plate specimen

	Length	Width	Thickness
Panel-1	149cm	150cm	15.4mm
Panel-2	147cm	148cm	14.8mm
Panel-3	148cm	151cm	14.0mm
Panel-4	150cm	150cm	13.6mm
Panel-5	152cm	151cm	13.4mm

### 5. 시험설비를 활용한 구조강도 평가

Table 2의 Panel-1 ~ Panel-5에 대해서 사변 고정 경계 조건을 구현하기 위해 구조시험 프레임의 볼트 위치 데이터를 사용하여 홀 가공을 먼저 수행하였다.

최초 시험설비 운용에서는, 본 시험에 앞서, 최소 두께를 갖는 Panel-5를 선택하고 이에 계측센서를 부착하지 않고 구조시험 프레임에 사변을 고정시켰다(Fig. 6 참조). 이 시험을 통해 하중 부가 시나리오를 설정하고 매뉴얼 부가 방식에 의해 하중 부가 시스템의 정상 작동 여부를 점검하고자 하였다. 부가 하중의 크기를 0 bar로부터 시작하여 최대 90 bar까지 단계적으로 5bar씩 증가시킨 결과, 동기화 된 6개의 유압 실린더가 동일한 압력으로 분포하중을 Panel-5에 가하고 있음을 확인할 수 있었다.



Fig. 6 Experimental setup for Panel-5 without instrumentation

이후, Panel-1 ~ Panel-4에 대해 스트레인 게이지와 선형가 변위치센서를 부착한 후 구조시험 프레임에 사변을 고정하여 본 시험을 준비하였다. 시험면적이 1 m<sup>2</sup>로써, 기하학적 대칭성과 CFRP 재료의 이방성 특성을 고려하여 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 스트레인 게이지(이하, SG)를 부착하였다. 여기서 SG 123, SG 456, SG 789는 3축 스트레인 게이지를 나타내며 SG 10, SG 11, SG 12는 1축 스트레인 게이지를 나타낸다. Fig. 8은 부착된 3축 및 1축 SG들의 사진을 보여주고 있다.

Fig. 9는 시험 준비가 완료된 Panel-1 ~ Panel-4 중 하나를 보여주고 있다 : 모든 계측센서가 부착된 Panel 사진(Fig. 9-a)과 데이터 수집 장치에 연결된 시험 준비가 완료된 Panel(Fig. 9-b)을 보여주고 있다.

Panel-1 ~ Panel-4에 적용하는 하중 부가 시나리오는 최소 하중 0bar에서부터 10 bar씩 단계적으로 증가시켜 최대 하중 150bar에 이르게 설정하였다. 부가된 하중 값에 대해 각 Panel의 구조적 응답성을 관찰한 후에 다음 단계의 하중 값으로 증가하기 위해 매뉴얼 부가 방식을 선택하였으며, 각 하중 단계마다 변형률과 처짐 데이터를 제어하고 취득하였다.

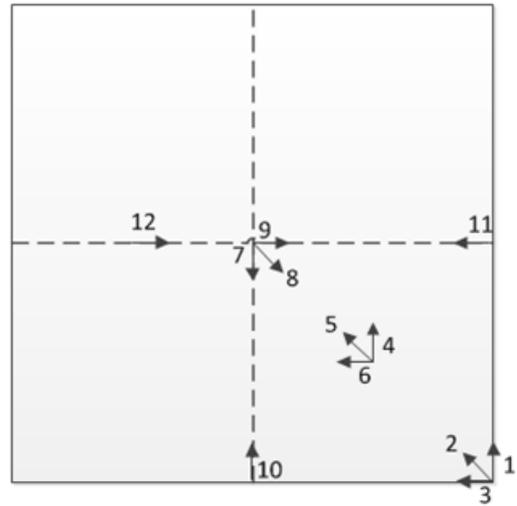
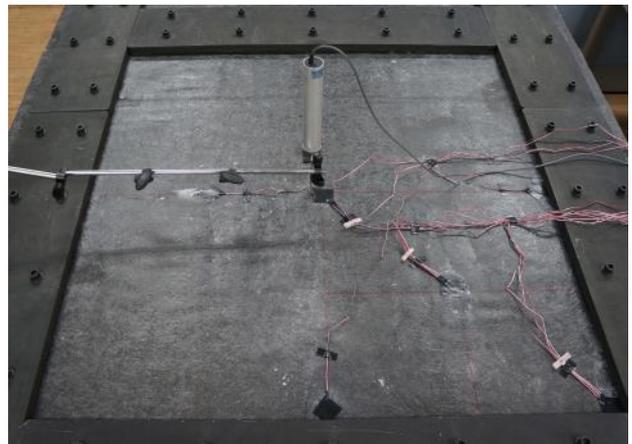


Fig. 7 Location of strain gauges



Fig. 8 Installed stacked rosette(left) and uni-axial(right) strain gauges



(a) CFRP test panel with instrumentation



(b) CFRP test panel with DAQ system

Fig. 9 Experimental setup for CFRP test panel

Fig. 10은 데이터 수집 장치로부터 얻은 Panel에 작용된 부가 하중의 이력을 보여주고 있다. 수직축은 하중(bar)을 나타내며 수평 축은 시간(second)을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 특정 하중을 Panel에 부가한 후 데이터 수집 장치를 통해 변형률과 처짐의 변화가 발생하지 않을 때까지 동일한 하중을 Panel에 부가하였다. Panel이 해당 하중을 완전히 흡수할 때까지 동일 하중을 지속시켰으며 이때 계측센서로부터 데이터를 취득 하였다. Fig. 10의 하중 이력은 또한 설정된 하중 부가 시나리오 대로 하중 부가 시스템이 작동하였음을 확인해 주고 있다. Panel-1 ~ Panel-4에 대해서 최대 하중인 150 bar에 이르기까지 변형률과 처짐이 계측되었으며 동시에 각 Panel에 대한 육안 점검(visual check) 및 음향 점검(sound check)을 수행하여 균열 발생 및 층간 분리와 같은 복합재료 기반 구조물의 초기 파손으로부터 점진적으로 확대되어 가는 파손 확장에 대해서 관찰하였다.

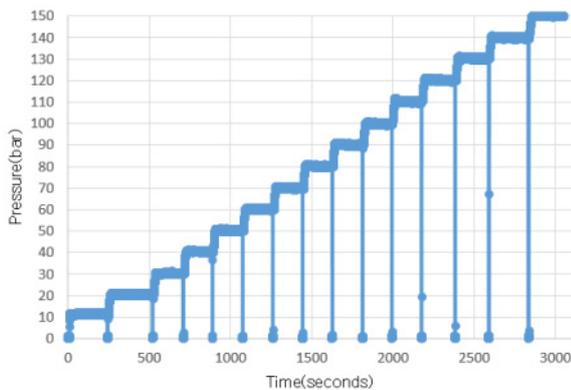


Fig. 10 Scenario of applied load to CFRP test panel

Fig. 11은 각 Panel에 대한 처짐 결과를 보여주고 있다. Panel-1 ~ Panel-4 모두 매우 유사한 처짐 분포를 보여주고 있으며, 하중이 증가함에 따라 계측된 처짐량은 선형에 가까운 분포를 공통적으로 보여주고 있다. 이러한 처짐 분포로부터, 시험 면적 1 m<sup>2</sup>를 기준으로 했을 때, 최대 하중 150bar에 이르는 동안 평균 폭 대 두께 비 70을 갖는 Panel-1 ~ Panel-4는 대변형을 동반하지 않는 선형영역에 존재함을 알 수 있다. 초기의 낮은 하중 범위인 20 bar까지는 Panel-4의 경우 다른 Panel들과 비교했을 때 비선형적 처짐 분포를 보여주고 있는데, 이는 이방성 특성을 갖는 다양한 형태의 직조된 탄소섬유와 로빙매트를 적층하여 시험용 판 구조물을 제작하는 과정에서 발생한 편차에 기인한다고 판단된다.

Fig. 12 ~ Fig. 14는 Panel-1 ~ Panel-4에 부착된 3축 스트레인 게이지로부터 계측된 변형률 분포를 보여주고 있다. 흥미로운 점은 처짐 결과와 마찬가지로 모든 3축 스트레인 게이지로부터 Panel-4가 낮은 하중인 20 bar에서 급격히 꺾어진 분포를 보여주는 것이다. 20 bar까지는 변형률이 거의 계측되지 않고 이후 변형률이 계측되기 시작하여 다른 Panel들과 매우 유사한 경향의 변형률 분포를 보여주고 있다. 이에 대한 분석은 처짐 시험

결과와 동일하게 이방성 특성을 갖는 적층 판 구조물인 Panel-4의 제작 과정에서 발생한 편차에 기인한다고 판단된다.

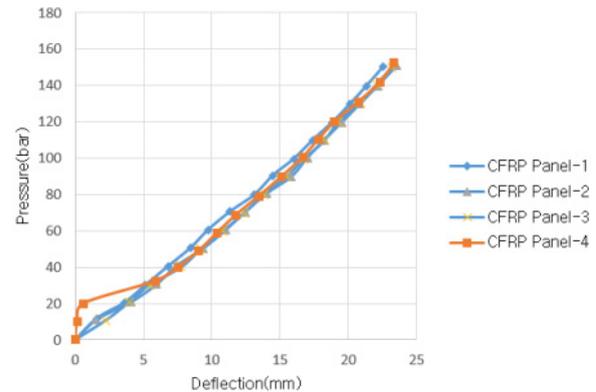


Fig. 11 Deflections of CFRP test panels

Panel-1 ~ Panel-4의 꼭지각 위치에 부착된 3축 스트레인 게이지로부터 계측된 변형률 분포를 Fig. 12에 나타내었다. 구조 시험 프레임의 길이와 폭 방향에 평행하게 부착된 SG 1번과 SG 3번은 초기 하중 범위에서 미세한 변형률을 보이다 이후로는 일정한 크기로 고정된 변형률 분포를 보이고 있다. 이는 사변 고정 조건 구현을 위한 구조시험 프레임이 Panel들의 구조적 거동에 영향을 준 것으로 판단된다. 반면 SG 2번은 부가된 하중이 발생 시킨 굽힘이 압축 변형률을 발생시켰으며 하중이 증가함에 따라 선형에 가까운 형태로 변형률이 증가함을 보여주고 있다.

SG 123번이 부착된 위치로부터 Panel-1 ~ Panel-4의 대각선 방향으로 1/4 지점 그리고 중앙인 1/2 지점에(Fig. 7 참조) 부착된 3축 스트레인 게이지로부터 얻은 변형률 분포를 각각 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. SG 4번부터 SG 9번까지 모두 인장 변형률이 계측되었으며 분포된 형태는 매우 유사하였다. Panel들의 사변 고정 조건 영향을 받은 SG 123번과 비교했을 때 SG 456번과 SG 789번으로부터 계측된 변형률은 모두 하중이 증가함에 따라 대체로 선형에 가까운 분포를 보여 주었으며 이는 시험에 사용된 Panel들이 선형영역에 존재함을 확인해 주고 있다.

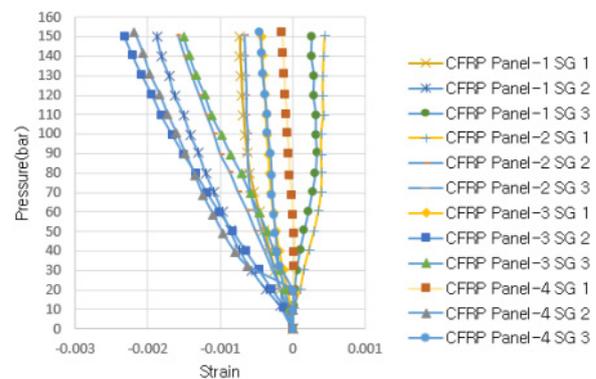


Fig. 12 Strain values of CFRP test panels from strain gauge numbers 1~3

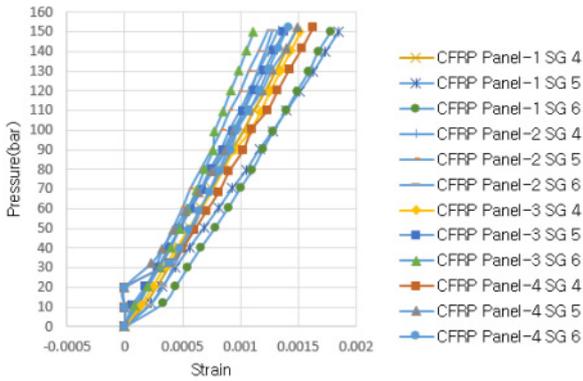


Fig. 13 Strain values of CFRP test panels from strain gauge numbers 4~6

서로 다른 위치의 3축 스트레인 게이지로부터 얻은 평균 변형률 값을 비교하면, SG 2번이(SG 13번은 제외) 가장 큰 변형률을 보여 주었으며 이어서 SG 456번 그리고 SG 789번의 순서로 변형률이 감소함을 알 수 있다. 이는 사변이 고정된 판 구조물에서 최대 변형이 고정단을 따라 발생함을 증명해 주고 있다.

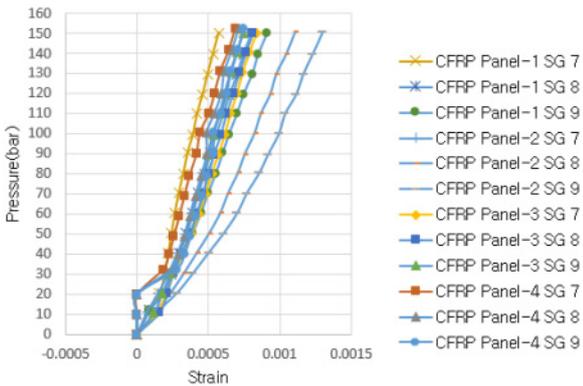


Fig. 14 Strain values of CFRP test panels from strain gauge numbers 7~9

Fig. 15 ~ Fig. 17은 Panel-1 ~ Panel-4에 부착된 1축 스트레인 게이지인 SG 10번, SG 11번 그리고 SG 12번으로부터(Fig. 7 참조) 계측된 변형률 분포를 보여주고 있다. 앞서 Panel-4에 대한 치짐과 변형률 결과에서 논의된 내용과 동일하게 하중 20bar까지는 거의 변형률이 발생하지 않고 이후에 변형률이 발생하기 시작하였다.

고정단 측면을 따라 Panel들의 길이와 폭 방향의 중심에 부착된 SG 10번과 SG 11번에서는, 사변 고정 조건의 영향을 받아, 압축 변형률이 계측되었으며 평균 변형률 값으로 비교한다면 두 스트레인 게이지에서 매우 유사한 변형률 분포를 얻었다.

한편, 고정단으로부터 떨어진 위치에 부착된 SG 12 번의(Fig. 7 참조) 경우 인장 변형률이 계측되었으며, 그 크기는 Panel들내 동일한 선상에 부착된 SG 9번과 SG 11번의 중간 값에 매우 근접한 변형률 분포가 계측되었음을 알 수 있다.

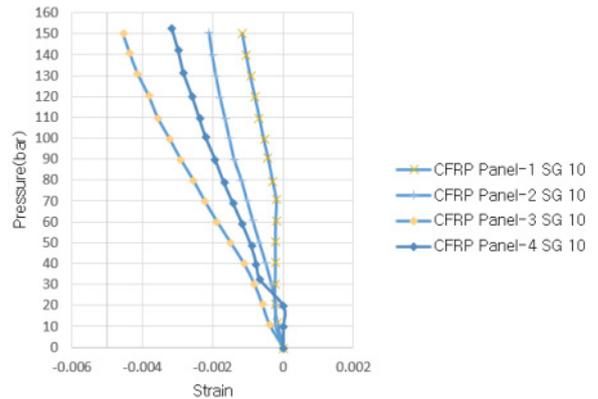


Fig. 15 Strain values of CFRP test panels from strain gauge number 10

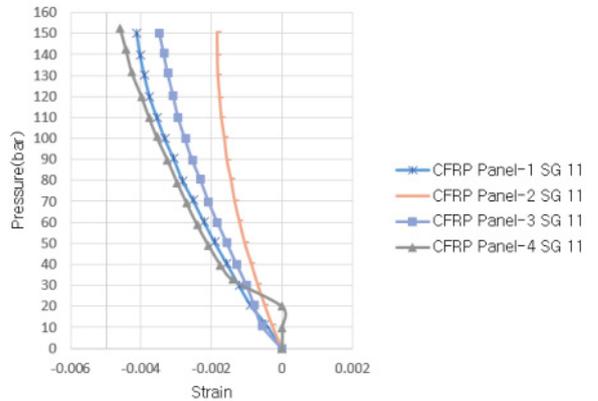


Fig. 16 Strain values of CFRP test panels from strain gauge number 11

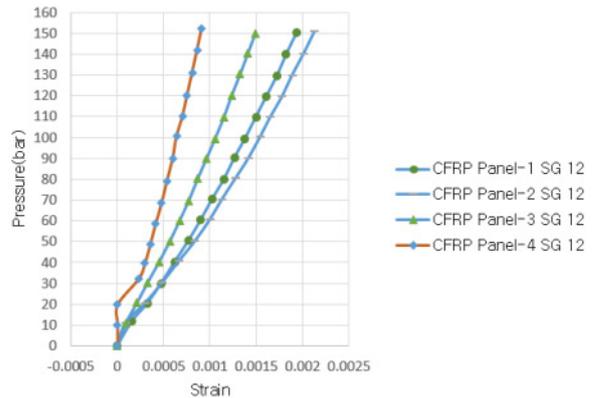


Fig. 17 Strain values of CFRP test panels from strain gauge number 12

## 6. 결론

본 논문에서는 FRP 재료를 사용한 레저선박에 대한 기존의 구조 설계 결과물을 보완하고 신뢰성을 높이기 위한 노력의 일환

으로써 실제 레저선박의 선체 구조물을 대상으로 시험적 구조강도 평가를 위한 시험설비 구축과 운용에 관한 내용을 다루었다. 특히 FRP 재료 중 우수한 공학적 재료 성질을 갖는 최첨단 CFRP 재료를 사용하여 제작된 레저선박의 선체 구조물을 대상으로 삼았다.

구조강도 평가를 위한 시험설비는 복합재료를 사용한 모노코크, 샌드위치 그리고 톱하트보강재로 보강된 선체 구조방식 등의 판 구조물을 사변 고정케 하였으며, 시험면적이 최소 1 m<sup>2</sup>에서 최대 1.5 m<sup>2</sup>까지 조정될 수 있도록 하였다. 아울러 판 구조물의 두께 정도를 판단할 수 있는 무차원 값인 판 구조물의 폭 대 두께 비는 최대 20까지 가능하도록 구조시험 프레임 제작하였다. 시험설비 운용에서는 CFRP 재료로 제작된 레저선박의 선체와 동일한 재료, 적층 설계 안 그리고 제작 공법을 사용한 시험면적 1 m<sup>2</sup>를 갖는 총 5개의 시험용 판 구조물을 제작하고 레저선박이 운항 중 경험하는 대표적인 하중인 횡 분포 하중을 외판면에 부가하였다. 평균 폭 대 두께 비가 70인 이들 두꺼운 시험용 판 구조물의 응답성은 선형가변위치센서와 스트레인 게이지로부터 처짐량과 변형을 분포를 계측하여 관찰하였다. 시험설비 운용 결과, 각각의 시험용 판 구조물에 대해 일관성 있는 하중-처짐 곡선과 변형률-하중 곡선을 얻었으며, 이들은 이론적인 해와 매우 제한적인 시편시험(coupon test) 결과에 기반을 둔 기존 레저선박 구조설계 규정의 적합성을 확인하고 관련 내용을 보완하는 기초자료로 활용될 것으로 본다.

본 시험설비를 활용한 향후 연구 내용으로는 다양한 폭 대 두께 비와 구조방식을 갖는 CFRP 재료 기반의 판 구조물에 대한 시험 결과를 축적하여, CFRP 재료를 사용하는 레저선박 선체의 현실적인 파손 기준을 제시하는 것이다. 시편시험과 판 구조물 시험에서 계측된 변형률 결과는 서로 다르므로 판 구조물의 파손 예측을 위해 시편시험에서 얻어진 최종 인장 변형률을 기준으로 하는 것은 비현실적이다. 더불어, 판 구조물의 파손 예측을 위한 현실적인 기준을 마련하기 위해서는 임의의 한 방향에서의 하중 보다는 본 시험설비 운용에서와 같이 평면응력으로 인한 인장, 횡 전단 그리고 굽힘 등의 조합 하중을 받는 판 구조물에 대한 시험 결과가 필요하다. 상기 연구를 통해 도출되는 일반화된(generalized) 하중-처짐 곡선과 변형률-하중 곡선은 이론적으로 유도된 해당 곡선들의 정확성을 점검하고 궁극적으로는 레저선박의 구조설계를 위한 설계차트(design charts) 개발을 위해 활용할 계획이다. 설계차트를 이용하여 설계자는 주어진 CFRP 재료의 성질에 대해 요구되는 판 구조물의 두께를 구하거나 또는 주어진 판 구조물의 두께에 대해 요구되는 CFRP 재료의 성질을 만족하는 적층 순서를 구할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 지역주력산업육성 기술개발사업 “회전제작장치를 이용한 보급형 AI+CFRP 레저보트 양산기술 개

발 및 제작/실증(R0004382)”과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다. 아울러, 본 연구에 사용된 시험용 CFRP 적층판은 제이와 이중공업(주)에서 지원 받았습니다.

## References

- Agarwal, B.D. & Broutman, L.J., 1990. *Analysis and performance of fiber composites*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc: USA.
- International Organization for Standardization(ISO), 2008. *ISO 12215-5: small craft - hull construction and scantlings - part 5: design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination*. Switzerland: International Organization for Standardization.
- Ji, S.H. Roh, J.S. Kang, S.W. Kim, H.W. & Kim, M.H., 2010. Structural safety evaluation of 40 feet sailing yacht by computational structure analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.703-708.
- Korean Register(KR), 2008. *Guidance relating to the rules for the classification of high speed light craft*. Korean Register: Korea.
- Lloyd's Register(LR), 2009. *Rules and regulations of the classification of special service craft*. Lloyd's Register: UK.
- National Instruments(NI), 2016. *PXI platform* [Online] Available at: <http://www.ni.com> [Accessed 3 March 2017].
- Oh, D.K. Lee, D.K. Kang, G.M. Ryu, C.H. & Noh, J., 2014. Comparative study of rules of ISO 12215 and international classification society for structural design of CFRP cruise boat. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(1), pp.77-84.
- Park, J.S. Ko, J.Y. Lee, K.W. & Oh, W.J., 2009. Structural analysis of an 38 feet diffusion style for high-speed catamaran yacht. *Journal of Navigation and Port Research*, 33(3), pp.167-174.
- Registro Italiano Navale(RINA), 2009, *Rules for the classification of pleasure yacht part B: hull and stability*. Italy: Imago Media.
- Seo, H.S. Jang, H.Y. Lee, I.W. & Choi, H.S., 2015. Development of 33 feet class America's Cup training CFRP sailing yacht for marine and leisure applications. *Composites Research*, 28(1), pp.15-21.
- Shenoi, R.A. & Wellicome, J.F., 1993. *Composite*

materials in marine structures, Vol. 2: Practical considerations. Cambridge, UK: Cambridge university press.

Shin, J.G. Lee, J.Y. Lee, J.H. Van, S.H. Lee, S.H. & Yoo, J.H., 2006. A study on the structural design and structural analysis for small yacht. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.75-86.

