

열수노화 조건에서 레저선박용 탄소섬유강화플라스틱의 강도변화에 관한 실험적 연구

정한구·노재규[†]
군산대학교 조선해양공학과

Experimental Study on the Hygrothermal Ageing Effect to the Strength of CFRP Materials for Marine Leisure Boat

Han Koo Jeong · Jackyou Noh[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University

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 experimental study on the hygrothermal ageing effect to the strength of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) materials for marine leisure boat manufactured by vacuum assisted resin infusion method. The experiments performed consist of tensile, flexural and shear tests according to American Society for Testing and Materials (ASTM) and Korean Industrial Standards (KS) test methods. Test coupons are varied from uni-directional(UD, 0°, 90°), Bi-Directional (BD), and Double-Bias (DB) carbon fiber fabrics in conjunction with epoxy resin. The results of tensile test show that tensile strength reduces significantly while not the same degree of reduction is observed for elasticity modulus with respect to the existence of hygrothermal ageing effect. This implies that the tensile strain induced from external load holds steady values but ultimate strength values change widely under hygrothermal ageing effect. In case of the flexural test, 0° UD shows more strength reduction than 90° UD while BD has reduced values in both flexural strength and elasticity modulus under hygrothermal ageing effect. It is learned that the bending strain induced from external load and ultimate strength values are reduced with respect to hygrothermal ageing effect. Shear test performed only on DB materials, and the results show marginal reduction in ultimate strength and moderate reduction in elasticity modulus. This means that the shear strain varies more than ultimate shear strength with respect to hygrothermal ageing effect. The experiment conducted in this paper clearly demonstrates the differences in material properties of the CFRP for the consideration of hygrothermal ageing effect. Findings obtained from this experimental study can serve as a fundamental input data for the realistic structural responses of marine leisure boat built in CFRP materials.

Keywords : Carbon fiber(탄소 섬유), Epoxy resin(에폭시 수지), Hygrothermal ageing effect(열수 노화 효과), Standard test method (표준 시험 방안), Vacuum assisted resin infusion method(VARIM, 진공 수지주입 성형공법)

1. 서론

탄소섬유는 대부분의 레저선박에서 건조 재료로 사용해진 유리섬유와 비교했을 때, 경량, 강도 및 강성 측면에서 재료의 기계적 물성치를 혁신적으로 발전시켰다. 이와 같은 우수한 재료 특성으로 인해, 기존의 E-glass 혹은 S-glass 등의 유리섬유를

탄소섬유로 대체하여 레저선박을 건조 및 운항 시 선체 강도 및 강성의 증가, 건조 재료의 절감, 선속의 증가 혹은 연료 효율의 증대 등의 여러 가지 측면으로 성능 향상을 기대할 수 있다.

아울러 탄소섬유는 강 기반의 건조 재료와 비교했을 때에도, 우수한 강도, 월등한 경량성, 충격 흡수성 그리고 뛰어난 내식성과 내마모성 등을 가지고 있어 앞으로 레저선박에 탄소섬유를 적

용한 사례는 꾸준히 늘어날 것으로 예측된다.

탄소섬유는 일반적으로 에폭시 수지와 혼합되어 탄소섬유강화 플라스틱 구조 재료가 된다. 구조 재료의 선택 시 고려하는 비강성(specific stiffness) 대 비강도(specific strength) 물성치 비교 내용을 탄소섬유강화플라스틱을 포함한 다양한 섬유강화플라스틱과 금속재료에 대해서 Fig. 1에 보여주고 있다. 이를 통해, 탄소섬유강화플라스틱이 비강성과 비강도 측면에서 모두, 전술된 바와 같이 우수한 재료 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

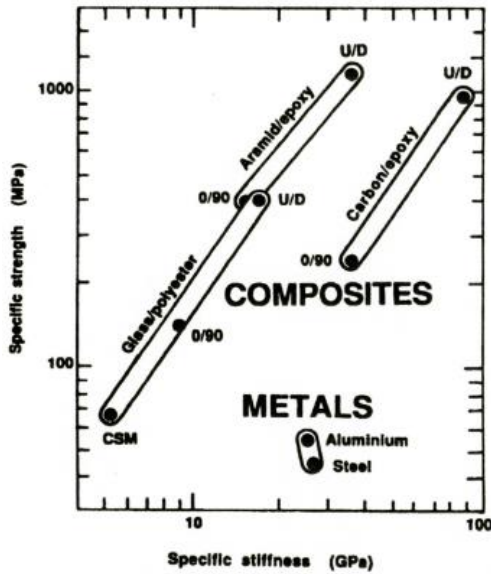


Fig. 1 Specific strength and stiffness properties for typical engineering materials (Gibson, 1993)

최근, 전 세계적인 레이저선박 시장에서의 섬유강화플라스틱 재료의 선택을 보면, 특히 24 m 이하의 레이저선박 부분에서 유리섬유강화플라스틱이 고부가가치 레이저선박을 추구하는 탄소섬유강화플라스틱으로 교체되며 차별화된 시장을 형성해 가고 있음을 알 수 있다 (Oh et al., 2014). Fig. 2는 국내에서 개발된 탄소섬유강화플라스틱이 적용된 레이저 선박을 보여주고 있다.



Fig. 2 Marine leisure boat built in CFRP

레이저선박의 운항은 내수면과 해양에서 모두 가능하나 대부분은 해양에서 레저 목적으로 운항되고 있다. 따라서, 염분과 변동하는 해수 온도의 다습한 환경 하에서 섬유강화플라스틱을 구성

하는 섬유와 수지가 받는 영향이 재료 강도와 같은 물성치에 미치는 효과를 이해하기 위한 연구가 필요하다.

유사 선행 연구에 관한 문헌 조사 결과 섬유강화플라스틱의 섬유 종류(유리 및 탄소 섬유), 제작 기법(수적층 및 진공적층), 그리고 시험의 종류(인장, 굽힘, 피로) 등의 내용으로 연구들이 수행되었음을 알 수 있다.

Hong et al. (2012) 등은 탄소섬유강화플라스틱 프리프레그를 사용하여 시편을 제작하고 고온 흡습 환경 하에서 인장 강도와 피로 수명에 관한 시험을 수행하여, 고온 흡습 환경이 인장 강도에 미치는 영향은 미비하나 피로 수명에는 큰 영향을 미친다고 밝혔다. 하지만 해당 시험은 항공기의 운항 환경에 관한 것이며 특히 레이저선박에서는 높은 제작 비용으로 인해 매우 제한적인 사용이 이루어지고 있는 프리프레그를 사용하였다. Kim et al. (2016) 등은 흡습 환경 하에서 폴리프로필렌/유리섬유 혼합직조 강화플라스틱이 폴리프로필렌강화플라스틱 및 유리섬유강화플라스틱과 비교하여 인장 강도, 굽힘 강도, 충격 강도 측면에서 어느 정도의 비교 강도를 갖는가에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 수적층과 진공적층의 2가지 방법으로 시편을 제작하였으나 진공 경화를 활용하여, 결과적으로는 시편이 진공적층이 주는 유사한 수지 함침율을 가지게 되어 2가지 서로 다른 성형 공정의 고려는 불분명해졌다. 폴리프로필렌/유리섬유혼합직조강화플라스틱이 폴리프로필렌강화플라스틱 및 유리섬유강화플라스틱 보다 인장, 굽힘 그리고 충격 강도에서 향상된 값을 보여줌을 확인하였다. Kim et al. (2010)과 Kim et al. (2014) 등은 유리섬유강화플라스틱을 사용한 선박 구조물의 재료 물성치 이해에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 수적층, 진공적층 및 수적층과 진공적층을 혼용한 방법에 따른 인장, 굽힘, 전단 강도를 비교 평가하였다. 해당 연구에서는 흡습 환경과 탄소섬유강화플라스틱은 고려하지 않았다. Park et al. (2013) 등은 풍력 블레이드 및 선박 구조물을 포함하는 해상 수송 시스템에 대한 구조 건전성 평가를 평직(plain) 탄소섬유강화플라스틱 시편에 대해 수행하였다. 탄소섬유강화플라스틱 프리프레그 시편을 사용하여 균열 저항 특성과 파괴 저항성 특성에 관한 연구를 수행하였으며, 직물의 방향성에 따른 재료 특성의 변화를 확인하였다. Choi et al. (2012) 등은 평직 탄소섬유강화플라스틱의 충격 잔류강도에 대한 평가를 수행하였는데, 충격자의 질량변화 및 크기변화에 따른 잔류강도 특성을 평가하였다. 충격자의 질량변화보다 직경변화가 탄소섬유강화플라스틱 프리프레그로 제작된 시편의 잔류강도에 미치는 영향이 크며 아울러 압흔의 크기와 압입량 측정을 통해 충격 잔류강도 저하 거동 예측이 가능하다고 밝혔다. Jang et al. (2015) 등은 진공적층 방법으로 흡습 환경을 고려하지 않은 능직(twill)과 주자직(satin) 기반의 탄소섬유강화플라스틱 시편을 제작하여 피로 환경에 노출시키고 인장과 굽힘 하중 하에서 잔류강도를 측정하였다. 능직과 주자직은 평직보다 인장강도에서는 우수하지만 피로강도측면에서는 낮은 성능과 감소된 잔류강도를 보여줌을 밝혔다. Kang et al. (2012) 등은 비 흡습 환경에서의 평직 탄소섬유강화플라스틱 프리프레그에 대해 섬유배열 각도를 변화시켜 가며 인장강도 시험을 수행하였다. 변화된 섬유배열 각

도에 대한 인정강도 결과로부터 Tan 강도이론 (Tan & Cheng, 1997)을 수정하고 이로부터 정적 파괴강도 예측식을 제안하였다.

위와 같이 정리된 유사 선행 연구 문헌 조사 결과로부터, 고부가가치 레저선박 제작에 그 활용도가 나날이 증대되고 있는 진공수지주입식 성형공법에 의해 제작된, 열수노화 조건이 적용된 탄소섬유강화플라스틱의 인장, 굽힘 및 전단강도 시험을 포함한 재료 강도에 관한 연구는 매우 미비한 것을 알 수 있다. 이는 탄소강화섬유플라스틱 레저선박의, 직접 해석법에 근거한, 구조강도 평가를 위한 유한요소모델 개발에 필수적인 재료 물성치에 대해 열수노화의 해양환경이 미치는 영향을 정량적으로 이해하기 위한 실험적 연구가 필요함을 말해주고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 부족한 내용을 보완하여 보다 신뢰도가 향상된 레저선박의 구조 설계 능력을 확보하고자 열수노화의 해양환경에 노출된 탄소섬유강화플라스틱의 실험적 구조 강도 평가에 관한 연구를 진행하였다.

2. 진공수지주입성형공법을 사용한 CFRP 시험편 제작

본 연구에서는 상온과 고온 다습한 염수 환경에서의 CFRP 적층 구조물의 재료 물성치를 확보하기 위한 선행으로 레저선박에 적합한 탄소섬유와 수지 조합에 대해서 조사를 수행하였다. 그 결과, 복잡한 선형과 곡면에 대해 우수한 적층 및 수지 함침 능력을 갖는 0°의 일방향으로 직조된 섬유(uni-directional fabric), 0°/90°의 양방향으로 직조된 섬유(bi-directional fabric) 그리고 ±45°방향으로 직조된 섬유(double-Bias fabric)에 레저선박의 선체 두께를 고려하여 200~400 g/m²의 중량을 갖는 탄소섬유를 선정하였다. 수지는 탄소섬유와 조합했을 때 우수한 재료 특성과 경량성을 제공하는 에폭시 수지를 선정하였다. 최종적으로 선정된 탄소섬유와 수지의 조합은 다음과 같다.

- Fabric system :
 - Uni-Directional Carbon fabric (UD, 0°, 300 g/m²)
 - Bi-Directional Carbon fabric (BD, 0°/90°, 200 g/m²)
 - Double-Bias Carbon fabric(DB, ±45°, 400 g/m²)
- Resin system :
 - Epoxy resin : KINETIX R118 infusion resin + H120 infusion hardener

상기 탄소섬유와 에폭시 수지 조합을 기반으로 한 CFRP 적층판을 진공수지주입식 성형공법으로 제작하였으며, Fig. 3은 친환경적 복합재료 제작 기법인 진공수지주입식 성형 장비의 구성을 보여주고 있다.



(a) Air cleaning system for vacuum assisted resin infusion facility



(b) Resin infusion system

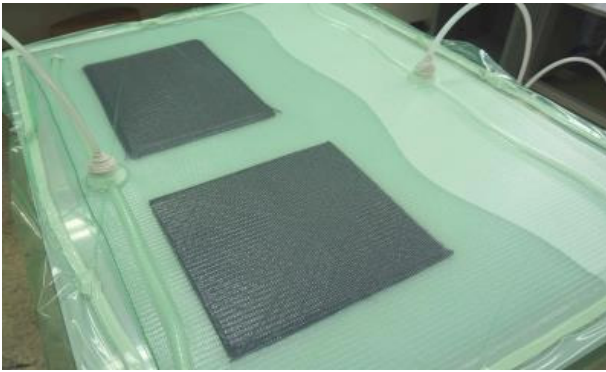
Fig. 3 Vacuum assisted resin infusion facility

Table 1 Determination of CFRP ply thickness using Vacuum Assisted Resin Infusion Method (VARIM)

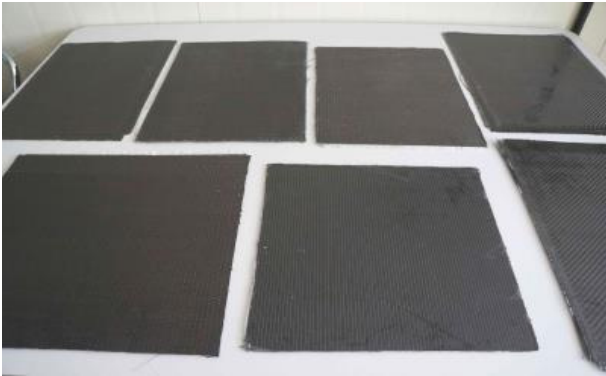
Reinforced fabric	Resin	Ply thickness (mm)
UD fabric (300 g/m ²)	Epoxy	0.29
BD fabric (200 g/m ²)	Epoxy	0.21
DB fabric (±45°, 400 g/m ²)	Epoxy	0.41

CFRP 적층판은 ASTM 및 KS에서 규정하고 있는 인장, 굽힘 그리고 전단 시험 규정을 바탕으로 시편 제작을 목적으로 제작하였다. 이때 각 규정에서 정의하는 시편 두께를 만족하는 탄소섬유 플라이(ply) 수를 파악하기 위해 Fig. 3에 보이는 진공수지주입식 성형 장비를 활용한 예비 적층을 통해 다양한 플라이 수를 갖는 복수의 사전 CFRP 적층판을 제작하였으며, 이로부터 Table 1에 보이는 바와 같이 각각의 탄소섬유 플라이 당 두께 정보를 도출하였다.

Fig. 4는 도출된 플라이의 두께 정보를 활용하여 ASTM 및 KS에서 권장하는 시편 제작을 위한 CFRP 적층판의 진공에 의한 수지함침 과정과 완성된 적층판의 사진을 각각 보여주고 있다.



(a) Saturation of Epoxy resin using VARIM



(b) Manufactured CFRP panels

Fig. 4 CFRP panels for test specimens

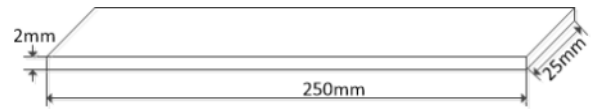
Table 2 Test methods used for CFRP test specimens

Test	Conditions	Test methods
Tensile test	Room temperature	ASTM D3039
	Hygrothermal ageing	Modified 240hr. KS D9502 + ASTM D3039
Bending test	Room temperature	ASTM D790
	Hygrothermal ageing	Modified 240hr. KS D9502 + ASTM D790
Shear test	Room temperature	ASTM D3518
	Hygrothermal ageing	Modified 240hr. KS D9502 + ASTM D3518

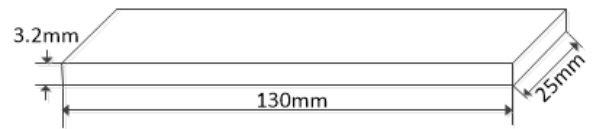
Table 2는 인장, 굽힘 및 전단 강도 시험을 위해 사용된 ASTM과 KS의 시험 규정 목록을 보여주고 있다. 해양환경을 고려하지 않은 실온(room temperature)환경과 해양환경을 고려한 열수노화(hygrothermal ageing)환경으로 구분하여 시험 규정을 정하였다. 열수노화 조건을 비교적 짧은 시간 내에 실험적으로 구현하기 위해 KS D 9502 (2014)에서 제시하는 염수침지를 수행함으로써 자연적인 해양환경을 재현하도록 시도하였다. 이를

위해, 일반적인 해수의 Sodium Chloride(NaCl) 농도는 약 3%이 나 이보다 더 가혹한 5% 농도의 NaCl 용액을 사용하였으며 염수 침지를 240시간 동안 반복 지속시켰다.

한편, Fig. 5는 인장, 굽힘 및 전단 강도 시험에 사용될 시편의 형상 및 치수 정보를 보여주고 있으며, 이들은 각각 ASTM D3039 (2014), ASTM D790 (2017) 그리고 ASTM D3518 (2013)의 권장 규격을 따랐다.



(a) Tensile and shear test specimens



(b) Bending test specimen

Fig. 5 Test specimen shapes and sizes

3. CFRP 적층 구조물의 강도 평가

실온과 열수노화 환경에서의 CFRP 적층 구조물의 재료 물성치를 이해하기 위한 강도 시험 평가를 진행하였다. 두 가지 환경에 대해 공통적으로 인장, 굽힘 그리고 전단 강도 시험을 수행하였다.

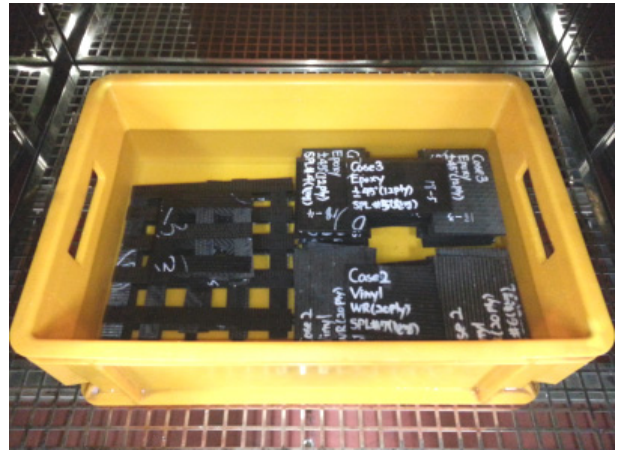


Fig. 6 Picture of the hygrothermal ageing of CFRP test specimens

Fig. 6은 시편 제작용 CFRP 적층판에 염수침지와 동시에 가열을 통해 열수노화를 가하고 있는 사진을 보여주고 있다.

3.1 인장 시험

인장 강도 시험 평가에서는 UD와 BD 직조 상태의 탄소섬유에 폭시 적층 시편을 고려하였으며, 시험에 사용된 시편의 종류 및 개

수는 Table 3에 보여주고 있다. UD의 경우 두 가지 시편을 준비하였는데 하나는 강화섬유 방향과 평행한 0° 방향이 시편의 길이 방향과 일치하는 경우이며 또 다른 하나는 강화섬유 방향과 직각을 이루는 90° 방향이 시편의 길이 방향과 일치하는 경우이다.

Table 3 Tensile test condition of CFRP test specimens

Fabric type	Quantity	Hygrothermal Ageing(HA)
UD(0°)	5	None
UD(90°)	5	
BD	5	
UD(0°)	5	Use 5% of NaCl at 35°C for 240 hours
UD(90°)	5	
BD	5	

Fig. 7은 인장 강도 시험 수행을 위해 만능재료시험기(MTS - QT100)에 시편이 장착된 사진을 보여주고 있다. 인장 시편은 전용지그를 활용하여 시편을 고정하였으며 이후 ASTM D3039 규정에 권장하는 정적하중 부가속도인 2 mm/min을 적용하였다. 신장계(Extensionmeter)를 시편에 장착하여 인장강도 및 탄성계수 등의 재료 물성치를 산출하였으며, 각 시편에 대한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 아울러, 각 시편에 대한 평균 값들을 Table 4에 정리하였다. Fig. 10은 ASTM D3039 규정에 의해 제작되고 시험이 완료된 파손된 시편을 보여주고 있다.

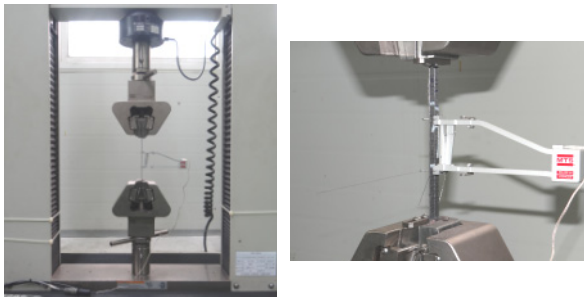


Fig. 7 Tensile test of CFRP test specimen

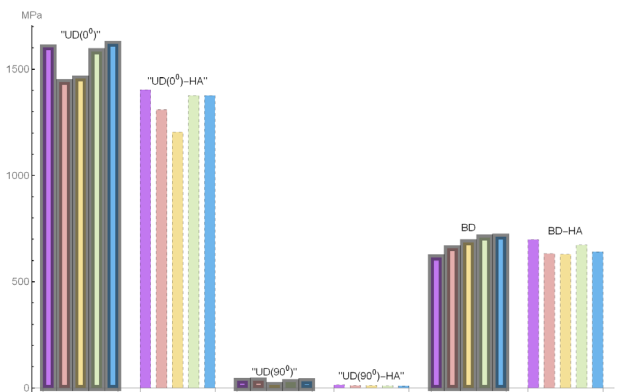


Fig. 8 Tensile strength variation of CFRP test specimens

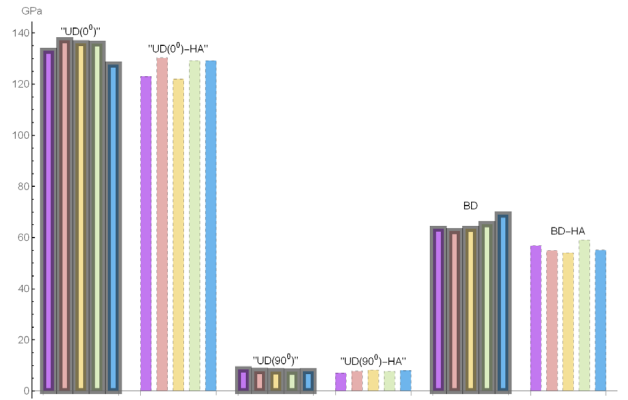
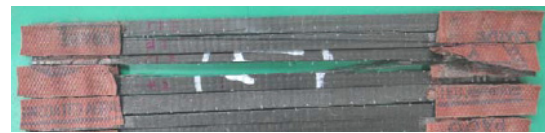


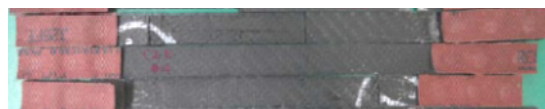
Fig. 9 Elastic modulus variation of CFRP test specimens



(a) UD(0°) tensile test specimen



(b) UD(90°) tensile test specimen



(c) BD tensile test specimen

Fig. 10 Pictures of damaged CFRP tensile specimens

UD(0°) 시편이 가장 큰 인장강도 값을 보여주었으며 이어서 BD 시편 그리고 UD(90°) 시편의 순으로 인장강도 값이 감소하였다. 탄성계수 결과도 동일한 양상을 보여주었다. Table 4에 나타난 결과는 강도와 탄성계수의 절대값이므로, 비교를 위하여 Table 5에 열수노화 효과 전·후의 인장강도 및 탄성계수의 비율 값을 계산하여 나타내었다.

Table 4 Results of CFRP tensile test specimens

Test specimen	Tensile strength(MPa)		Elastic modulus(GPa)	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
UD(0°)	1540.14	76.37	133.94	3.43
UD(0°)-HA	1333.36	71.77	126.74	3.50
UD(90°)	28.72	7.00	7.86	0.30
UD(90°)-HA	11.70	1.97	7.75	0.40
BD	675.58	36.42	64.72	2.31
BD-HA	654.40	27.01	56.00	1.78

Table 5 Comparison of tensile test results considering hydrothermal ageing effect

Test specimen	Tensile strength ratio	Elastic modulus ratio
UD(0°)-HA / UD(0°)	0.87	0.95
UD(90°)-HA / UD(90°)	0.41	0.99
BD-HA / BD	0.97	0.87

UD(0°)의 경우에 15%의 강도 감소와 5%의 탄성계수 감소가 일어났다. UD(90°)의 경우에는 59%의 강도 감소로 가장 큰 강도 손실이 계속되었으나 탄성계수는 거의 변화가 발생되지 않았음을 알 수 있다. 한편, BD의 경우에는 인장 강도가 소폭 감소하였으나 (3%) 탄성계수는 13% 감소하였음을 알 수 있다. UD(0°)와 BD의 경우에는 섬유방향으로 인장하중을 견디게 되나, UD(90°)의 경우에는 섬유에 수직인 방향으로 하중을 받게 되어 수직 강도가 주요한 강도 인자 역할을 담당하게 되었다. 이로 인해 UD(90°)에서의 강도 감소율이 가장 큰 것으로 판단된다. 전체적으로 인장하중을 받는 시편의 경우 강도는 감소의 폭이 크나 탄성계수는 상대적으로 변화의 폭이 작은 것을 확인하였다.

3.2 굽힘 시험

굽힘 강도 시험 평가는 ASTM D790 규정을 사용하여 수행하였으며 인장 시험과 동일하게 UD와 BD 직조 상태의 탄소섬유/에폭시 적층 시편을 고려하였다. Table 6는 시험에 사용된 시편의 종류 및 개수를 보여주고 있다.

Table 6 Bending test condition of CFRP test specimens

Fabric type	Quantity	Hygrothermal Ageing(HA)
UD(0°)	5	None
UD(90°)	5	
BD	5	
UD(0°)	5	Use 5% of NaCl at 35°C for 240 hours
UD(90°)	5	
BD	5	

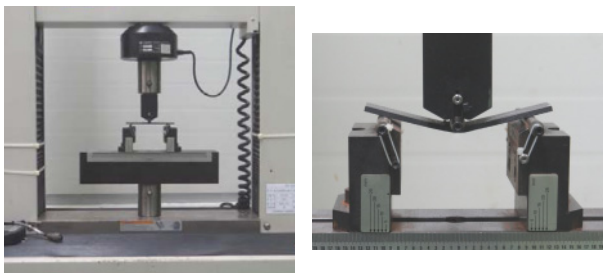


Fig. 11 Bending test of CFRP test specimen

Fig. 11은 MTS-QT100에 3점 굽힘 전용지그를 활용하여 시편을 거치한 후 시편 중앙부에 5.3 mm/min의 정적하중을 부가하여 시험을 수행한 사진을 각각 보여주고 있다. 시편의 굽힘강도 및 접선탄성계수 등의 재료 물성치를 계측하였으며, 각 시편에 대한 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 또한, 각 시편에 대한 평균 값들을 Table 7에 정리하였다. Fig. 14은 ASTM D790 규정에 의해 제작되고 시험이 완료된 파손된 시편을 보여주고 있다.

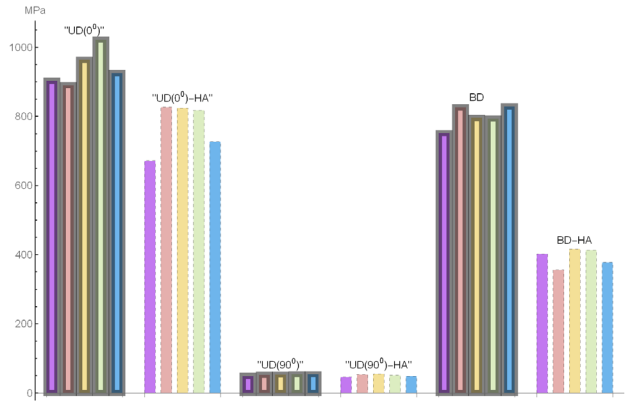


Fig. 12 Flexural strength variation of CFRP test specimens

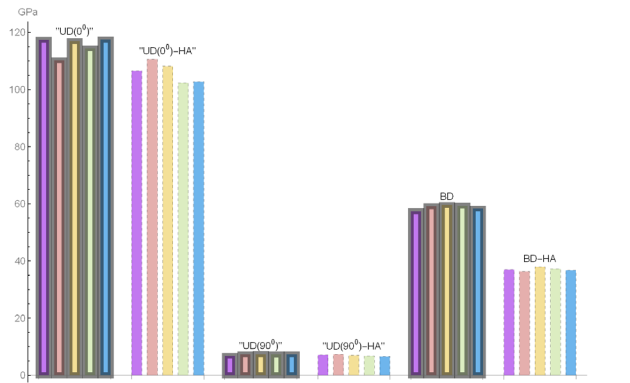
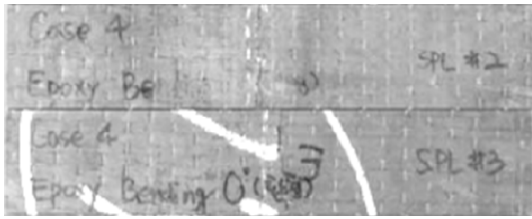


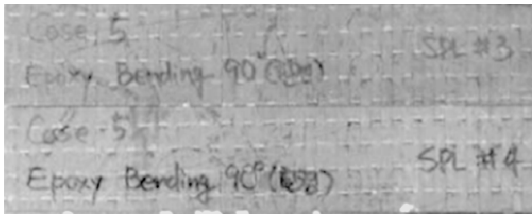
Fig. 13 Tangent modulus of elasticity variation of CFRP test specimens

Table 7 Results of CFRP bending test specimens

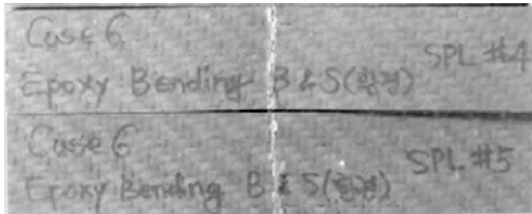
Test specimen	Flexural strength (MPa)		Tangent modulus of elasticity(GPa)	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
UD(0°)	941.02	47.62	115.31	2.77
UD(0°)-HA	773.37	63.03	106.13	3.14
UD(90°)	52.82	1.82	7.24	0.20
UD(90°)-HA	51.05	3.45	6.99	0.23
BD	799.36	27.91	58.81	0.81
BD-HA	393.15	22.89	37.14	0.45



(a) UD(0°) bending test specimen



(b) UD(90°) bending test specimen



(c) BD bending test specimen

Fig. 14 Pictures of damaged CFRP bending specimens

UD(0°), BD 그리고 UD(90°) 시편의 순서대로 굽힘강도 값과 탄성계수 값, 모두 감소하는 결과를 보여주었다. Table 7의 결과에 대해, 열수노화 효과가 굽힘 시편의 재료 물성치에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Table 8에 열수노화 효과 전·후의 굽힘강도 및 접선탄성계수의 비율값을 나타내었다. UD(0°)는 18%의 강도 감소와 8%의 탄성계수 감소를 보인 반면, UD(90°)는 열수노화 적용 전 시편 결과 기준으로 모두 97%의 강도와 탄성계수 값을 가졌다. BD의 경우에는 가장 큰 51%의 강도 감소가 발생했으며 탄성계수 역시 다른 UD 시편에 비해 가장 큰 37%의 감소가 발생한 것을 알 수 있다.

Table 8 Comparison of bending test results considering hygrothermal ageing effect

Test specimen	Flexural strength ratio	Tangent modulus of elasticity ratio
UD(0°)-HA / UD(0°)	0.82	0.92
UD(90°)-HA / UD(90°)	0.97	0.97
BD-HA / BD	0.49	0.63

굽힘시험의 결과 값을 보면 UD(0°)가 UD(90°)에 비해 강도와 탄성계수의 감소량이 모두 더 많음을 알 수 있다. 또한 BD의 경

우, 강도와 탄성계수 값이 가장 크게 감소하였다. 이는 인장시험에서의 결과와 다른 경향을 보여주는 것으로, 시편에 작용한 횡하중의 방향성과 시편의 직조상태 간의 상호작용에 의해 발생된 것으로 이해할 수 있다.

3.3 전단 시험

전단 시험에서는 ASTM D3518 규정을 사용하여 탄소섬유에 폭시 적층 시편의 평면 전단 강도를 평가하였다. 본 시험에서는 평면 전단 하중의 방향성을 고려하여 탄소섬유의 직조 상태가 ±45°인 DB를 선택하여 CFRP 적층 시편을 제작하였다. Table 9은 시험에 사용된 시편의 종류 및 개수를 보여주고 있다.

Table 9 In-plane shear test condition of CFRP test specimens

Fabric type	Quantity	Hygrothermal Ageing(HA)
DB	5	None
DB	5	Use 5% of NaCl at 35°C for 240 hours

Fig. 15는 전용지그를 활용하여 MTS-QT100에 장착된 CFRP 적층 시편의 평면 전단 강도 시험 수행 장면을 보여주고 있다. 시편에 2 mm/min의 변형속도로 정적하중을 부가하였으며 신장계(Extensionmeter)를 사용하여 시편의 전단강도 및 전단탄성계수 등의 재료 물성치를 계측하고, 각 시편에 대한 결과를 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었으며, 각 시편에 대한 평균 값들은 Table 10에 정리하였다. Fig. 18은 ASTM D3518 규정에 의해 제작되고 시험이 완료된 파손된 시편을 보여주고 있다.



Fig. 15 In-plane shear test of CFRP test specimen

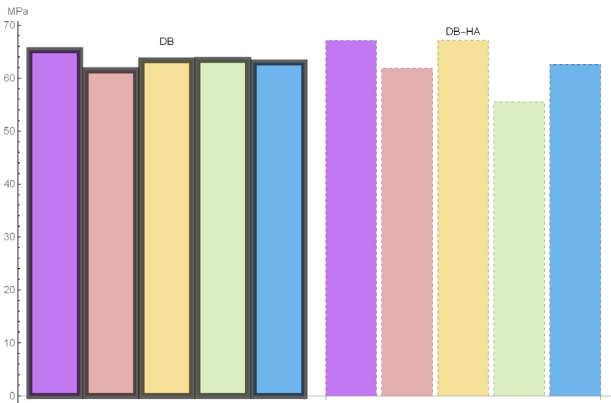


Fig. 16 Shear strength variation of CFRP test specimens

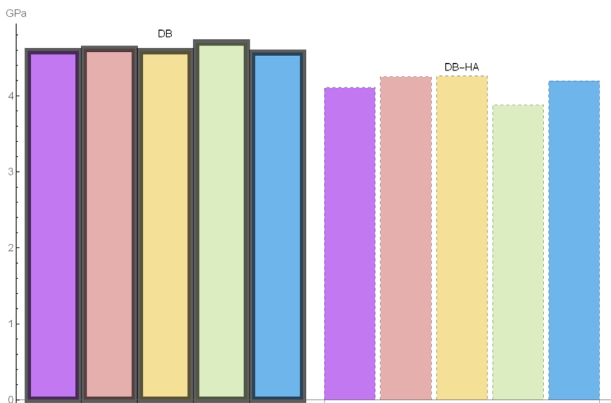


Fig. 17 Chord shear modulus of elasticity variation of CFRP test specimens

Table 10 Results of CFRP in-plane shear test specimens

Test specimen	Shear strength(MPa)		Chord shear modulus of elasticity(GPa)	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
DB	63.31	1.23	4.61	0.05
DB-HA	62.81	4.28	4.14	0.14



Fig. 18 Picture of damaged CFRP shear specimen

실온과 열수노화 환경에서의 평면 전단 시험 결과에 대해서 CFRP 적층 구조물의 재료 물성치 변화를 살펴보고자 Table 11에 열수노화 효과 전·후의 전단강도와 전단탄성계수의 비율값을

계산하였다. 전단강도의 경우 1%의 감소로 거의 동일한 값을 보였으나 전단탄성계수는 11%의 감소로 상대적으로 많은 물성치의 저하를 보여주었다. 따라서 열수노화 효과가 평면 전단 하중을 받는 CFRP 적층 구조물에 적지 않은 재료변형을 발생시켰음을 알 수 있다.

Table 11 Comparison of in-plane shear test results considering hygrothermal ageing effect

Test specimen	Shear strength ratio	Chord shear modulus of elasticity ratio
DB-HA / DB	0.99	0.89

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유강화플라스틱을 건조 재료로 선택하는 고부가가치 레이저선박의 신뢰도 있는 구조강도 평가를 위해 필수적인 유한요소해석 기반의 직접해석법에 요구되는 재료 물성치에 대해 염분 흡수 환경인 열수노화 효과가 미치는 영향을 시험 평가를 통해 정량적으로 분석하였다. 이는 기존의 선행 연구들 중 산업계에서 사용되고 있는 해양레저용 탄소섬유강화플라스틱을 진공수지주입식 성형공법으로 시편을 제작하고 염분 흡수 환경의 열수노화 조건을 적용한 후 인장, 굽힘 및 전단강도 시험을 통해 재료 강도에 관한 실험적 연구가 수행된 문헌 확보에 많은 어려움이 있어 본 연구를 수행하였다.

이를 위해, 레이저선박에 적합한 탄소섬유와 에폭시 수지 조합을 선정하였으며 친환경적이며 우수한 수지 함침율을 제공하는 진공수지주입식 성형공법을 사용하여 인장, 굽힘 그리고 전단 강도 시험을 위한 CFRP 적층 평판 구조물을 제작하였다. 제작된 평판 구조물은 ASTM D3039, ASTM D790, ASTM D3518 그리고 KS D9502의 관련 시험 규정에 따라 시편을 제작하고 열수노화 해상 환경을 구현 및 적용하였다. CFRP 적층 시편의 구조 강도 시험 평가를 통해 열수노화 효과가 재료의 인장, 굽힘 및 전단 물성치 모두의 저하를 초래함을 확인하였으며 이는 작용하는 하중의 방향성과 이를 견디는 시편의 강화섬유의 직조상태 조합에 따라 상이한 결과를 주었다. 본 시험 평가를 통해 도출된 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

인장 시험은 UD(0°), UD(90°)와 BD에 대해서 수행되었으며 BD를 제외하고 모두 열수노화 효과로 인해 인장강도가 탄성계수보다 많은 감소량을 보인 것을 확인하였다. BD의 경우 탄성계수의 감소 폭이 인장강도의 감소 폭보다 컸다. UD(90°)의 경우 탄성계수는 거의 동일한 값을 보여준 반면 인장강도는 59%의 감소를 보여주었는데, 이는 열수노화 효과로 인해 CFRP 적층 시편의 강도가 저하된 상태에서 강화섬유에 수직인 방향으로 하중을 받아 결과적으로 수지 강도가 주요 강도 인자 역할을 하면서 발생한 것으로 판단된다. 굽힘 시험 역시 UD(0°), UD(90°)와 BD에

대해서 수행되었으며 시험 전반에 걸쳐 탄성계수에 비해 굽힘강도에서의 열수노화 조건이 상대적으로 큰 감소를 발생시키는 것을 확인하였다. 특히나, BD기반의 CFRP 적층 시편의 경우 굽힘강도가 절반 이하로 급격히 감소되었으며 탄성계수 또한 37%로 비교적 큰 감소 폭을 보여주었다. 이로부터 BD의 경우에 열수노화 조건에 노출되면 외부 황하중에 대해 실온 시험에서 얻어진 굽힘강도보다 낮은 하중에서 파손이 발생되며 이때의 변형량도 많이 발생함을 알 수 있다. 황하중을 받는 300 g/m^2 의 동일한 단위 면적 당 중량을 갖는 UD(0°)와 UD(90°)는 하중의 방향에 대해서 상이한 강화섬유 정렬배치를 가지고 있다. 즉, 강화섬유 길이의 차이는 존재하지만, 하중의 방향에 대해서 시편의 길이 방향보다 폭 방향으로 정렬된 강화섬유의 수가 많으며 이로 인해 UD(90°) 시편이 UD(0°) 시편보다 열수노화 환경으로부터 상대적으로 적은 굽힘 강도 감소의 영향을 받은 것으로 분석된다. BD의 경우 200 g/m^2 의 단위 면적 당 중량을 가지며, 이는 UD에 비해 수지 함침율이 높음을 의미한다. 비록 BD 시편의 강화섬유 배치가 0° 와 90° 로 정렬되었으나, UD에 비해 상대적으로 많은 비율의 수지가 열수노화에 노출된 후 강화섬유를 구조적으로 구속하는 능력이 저하되었고 그 결과 BD 시편에서 굽힘강도의 감소가 크게 발생한 것으로 분석된다. 본 시험 결과를 분석해 보면, 구조적 성능이 향상된 레저선박의 적층 설계를 위해서는 상대적으로 낮은 단위 면적 당 중량을 갖는 BD를 열수노화 조건에 직접적으로 노출시키지 않도록 선체 바깥쪽이 아닌 안쪽에 적용하는 설계 안이 황하중에 의한 재료 물성치 감소를 고려할 때 적절하다고 판단된다. 전단 시험은 DB에 대해서 수행되었으며 1%의 전단강도 감소와 11%의 전단탄성계수 감소를 보여주었다. 전단강도의 변화는 거의 발생하지 않았으나 전단탄성계수의 감소가 많이 발생하여, 열수노화 조건을 거치고 나면 외부 전단 하중에 CFRP 적층 시편에 상대적으로 많은 변형이 발생됨을 알 수 있다. 전단 시험 결과를 분석해 보면, 평면 전단하중을 받는 400 g/m^2 의 단위 면적 당 중량을 갖는 DB의 경우 열수노화 환경이 강화섬유를 구조적으로 구속하는 수지에 영향을 주어 전단탄성계수가 저하된 반면, 주어진 하중방향에 대해 강화섬유가 파단되며 예측되는 전단강도에는 열수노화 환경이 미비한 영향을 준 것으로 이해된다.

References

- ASTM Standards D790, 2017. *Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. ASTM International, PA 19428-2959, US.
- ASTM Standards D3039, 2014. *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. ASTM International, PA 19428-2959, US.
- ASTM Standards D3518, 2013. *Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate*. ASTM International, PA 19428-2959, US.
- Choi, J.H., Kang, M.S., Koo, J.M. & Seok, C.S., 2012. Evaluation of residual strength under impact damage in woven CFRP composites. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(6), pp.654-663.
- Gibson, A.G., 1993. *Composites in offshore structures*. Composite materials in maritime structures edited by Sheno, R.A. & Wellicome, J.F., Cambridge University Press: Cambridge.
- Hong, S.W., Ahn, S.S., Koo, J.M. & Seok, C.S., 2012. Analysis of characteristics of CFRP composites exposed under high-temperature and high-humidity environment for a long period. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, 36(8), pp.889-895.
- Jang, J.W., Cho, J.H., Oh, D.J. & Kim, M.H., 2015. Fatigue life prediction of CFRP using fatigue progressive damage model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp.248-254.
- Kang, M.S., Park, H.S., Choi, J.H., Koo, J.M. & Seok, C.S., 2012. Prediction of fracture strength of woven CFRP laminates according to fiber orientation. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, 36(8), pp.881-887.
- Kim, D., Hennigan, D.J. & Beavers, K.D., 2010. Effect of fabrication processes on mechanical properties of glass fiber reinforced polymer composites for 49 Meter (160 foot) recreational yachts. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2, pp.45-56.
- Kim, S.Y., Shim, C.S., Sturtevant, C., Kim, D. & Song, H.C., 2014. Mechanical properties and production quality of hand-Layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6, pp.723-736.
- Kim, Y.H., Park, C.W., Jung, G.S. & Shin, S.J., 2016. Environment deterioration characteristics of polypropylene / glass fiber composites under moisture absorption environment. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(6), pp.520-525.
- KS D9502, 2014. *Methods of Neutral Salt Spray Testing*. Korean Standards and Certifications.
- Oh, D.K., Lee, D.K., Kang, G.M., Ryu, C.H. & Noh,

J.K., 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, S.C., Kang, S.S., Kim, G.Y. & Choi, J.H., 2013. Evaluation of tensile strengths and fracture toughness of plain weave composites. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 37(8), pp.862-868.

Tan, S.C. & Cheng, S., 1997. Failure criteria for fibrous anisotropic materials. *International Journal of*

Materials in Civil Engineering, ASCE, 5(2), pp.198-211.



정 한 구



노 재 규