

다양한 온도 환경에 따른 3D 프린트 복합재료의 기계적 물성 평가

강상훈* · 김도현* · 서형석*†

Mechanical Properties of 3D Printed Composite Material on Various Thermal Environment

Sang-Hun Kang*, Do-Hyeon Kim*, Hyoung-Seock Seo*†

ABSTRACT: Currently, there are many discussions about composite materials and 3D printed composite material to weight reduction of ships. A test was conducted to confirm the applicability of the 3D printed composite material to ships and offshore structures by linking the 3D printing technology with excellent productivity and the composite material with corrosion resistance and lightweight characteristics in salt water environments. In order to apply the 3D printed composite material used in this paper to ships and offshore structures, the temperature environmental effects that can be exposed in the marine environment should be considered. Therefore, the tensile test was conducted with specimen of Carbon + Onyx, Carbon + Nylon, HSHT glass + Onyx, HSHT glass + Nylon material in low temperature (-50°C), room temperature (20°C), and high temperature (50°C) environments that can be exposed to the marine environment. As a result of the tensile test, the carbon + onyx specimen showed the highest tensile strength and the HSHT glass + onyx specimen showed the highest tensile strain. In addition, by analyzing the tested specimens, the failure mode of the 3D printed composite material specimens exposed to various temperature environments was analyzed.

초 록: 선박 경량화와 관련하여 기존 복합재료 및 3D 프린트 복합재료를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 염수 환경에 대한 내부식성과 경량화 특성이 있는 복합재료와 우수한 생산성을 가지는 3D 프린팅 기술을 연계한 3D 프린트 복합재료의 선박 및 해양구조물 적용 가능성을 확인하기 위해 시험을 진행하였다. 본 논문에서 사용된 3D 프린트 복합재료를 선박 및 해양구조물에 적용하기 위해서는 해양환경에서 노출될 수 있는 온도 환경 영향을 고려해야 한다. 따라서 해양 환경에서 노출될 수 있는 온도인 저온(-50°C), 상온(20°C), 고온(50°C) 환경에서 Carbon + Onyx, Carbon + Nylon, HSHT glass + Onyx, HSHT glass + Nylon 소재의 시편으로 인장시험을 진행하였다. 인장시험 결과, Carbon + onyx 시편이 가장 높은 인장강도를 보였고 HSHT glass + onyx 시편이 가장 높은 인장 변형률을 보였다. 또한 인장 시험 결과 시편을 분석하여 다양한 온도 환경에 노출된 3D 프린트 복합재료 시편의 파손 형상에 대해 분석하였다.

Key Words: 3D 프린팅(3D printing), 복합재료(Composite materials), 온도 환경(Thermal environment), 기계적 특성(Mechanical properties)

1. 서 론

최근 국제해사기구(IMO)의 탄소중립 배출량 규제에 인하여 선박의 경량화에 대한 활발한 논의가 이루어지고 있다

[1]. 복합재료는 염수 환경에 대한 뛰어난 내부식성과 경량화 특성이 있기 때문에 선박 및 해양구조물에서 활발하게 사용되고 있다[2]. 3D 프린트 복합재료의 경우 기존 복합재료의 단점인 복잡한 형상 제작이 가능하다[3].

Received 31 May 2023, received in revised form 9 June 2023, accepted 24 June 2023

*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan

†Corresponding author (E-mail: seohs@ulsan.ac.kr)

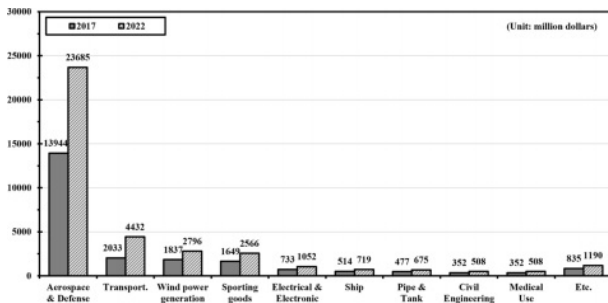


Fig. 1. Use of composite material on industries [7]

선박 및 해양구조물에 복합재료를 적용하기 위해서는 온도 환경에 대한 영향을 반드시 고려해야 한다. 그 이유는 선박의 경우 항해 경로에 따라 갑판은 -45°C 에서 45°C 까지 다양한 온도 환경에 노출[4, 5]되고, 해양구조물의 경우 설치 환경에 따라 -2°C 에서 40°C 사이의 온도 환경에 노출된다[6]. 따라서 선박 및 해양구조물에 3D 프린트 복합재료를 적용하기 위해서는 다양한 온도 환경에 따른 기계적 물성의 변화를 고려해야 한다.

Torabizadeh[8] 등은 유리섬유/에폭시 복합재료의 적층 각도에 따른 상온 및 저온 환경에서의 기계적 강도에 대한 연구를 진행하였다. 유리섬유/에폭시 복합재료의 경우 온도가 낮아질수록 탄성계수와 인장강도가 증가하는 현상을 보였고, 적층 각도에 따라 저온 영향의 차이가 있는 것으로 나타났다. Ou Yunfu[9] 등은 다양한 인장 속도와 온도 환경에서의 GFRP 소재의 기계적 특성을 연구하였다. 25°C 부터 100°C 까지의 온도 환경에서의 인장시험에서 온도가 높아질수록 수지의 연화 및 강화재와 기지재 사이의 계면의 약화로 인해 탄성계수와 인장강도가 저하하는 현상을 확인하였다. Kubo[10] 등은 탄소섬유/에폭시, 유리섬유/에폭시 복합재료의 상온과 극저온 환경에서의 기계적 강도에 대한 연구를 진행하였다. 두 복합재료 모두 극저온 환경에서 인장강도가 증가하는 경향을 보였다.

기존 복합재료의 경우 온도영향에 대한 기계적 강도 연구가 많이 수행되었지만, 3D 프린트 복합재료의 경우 온도 환경 영향 평가 연구가 많이 수행되지 않았다. 이에 본 논문에서는 3D 프린트 복합재료의 선박 및 해양구조물 적용을 위한 저온 및 고온 환경에서의 인장 특성을 비교하였다. 시편은 연속 섬유 두 종류와 기본 복합재료 두 종류를 사용하여 제작하였으며 제작한 시편의 기계적 물성 변화를 확인하기 위해 인장 시험을 진행하였다. 이를 통해 3D 프린트 복합재료의 선박 및 해양구조물 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 시편 및 시험 방법

2.1 시편 제작

3D 프린트 복합재료 시편은 ASTM D3039[11]를 준용하

여 제작하였다. 시편 제작을 위해 사용된 3D 프린터는 Markforged사의 Mark Two를 이용하였다. 시편 제작을 위해 사용된 기본 복합재료의 종류는 오닉스(onyx)와 나일론(nylon) 두 종류이며 연속 섬유는 탄소섬유 필라멘트(carbon fiber filament)와 고강도고온 유리섬유 필라멘트(HSHT fiberglass filament) 두 종류이다. 필라멘트의 프린팅 방향은 Table 1과 같이 다양한 방향에서 일관된 인장 특성을 보이는 준등방성 적층을 하였다[12]. 시편의 치수는 Fig. 2와 같으며 전체 길이는 200 mm, 폭은 20 mm이다. 연속 섬유에 따라 사용하는 노즐의 직경이 달라지므로 동일한 적층을 갖는 시편의 두께는 연속 섬유에 따라 달라진다. 탄소 섬유 필라멘트를 사용하는 경우 0.125 mm씩 적층되며, 고강도고온 유리섬유를 사용하는 경우 0.1 mm씩 적층된다. 따라서 시편의 총 두께는 탄소섬유 시편의 경우 2.0 mm, 고강도고온 시편의 경우 1.6 mm이다. 탭의 길이는 40 mm, 두께는 1.5 mm이다.

Table 1. Laminate information

Type	Material	Printing Direction	Layers
Carbon + Onyx	Onyx	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
	Carbon	$[0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_5$	8
	Onyx	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
Carbon + Nylon	Nylon	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
	Carbon	$[0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_5$	8
	Nylon	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
HSHT Glass + Onyx	Onyx	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
	HSHT Glass	$[0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_5$	8
	Onyx	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
HSHT Glass + Nylon	Nylon	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4
	HSHT Glass	$[0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_5$	8
	Nylon	$[\pm 45^{\circ}]_2$	4

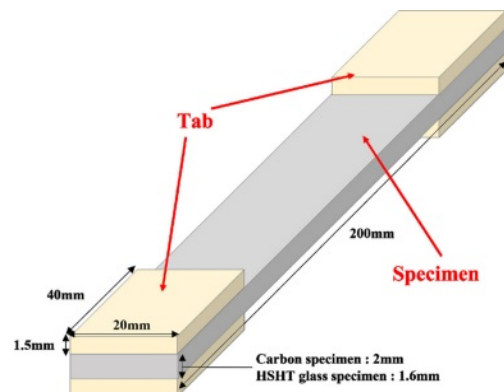


Fig. 2. Dimension of Specimen

2.2 온도 환경

온도 환경의 경우 저온(-50°C), 상온(20°C), 고온(50°C) 3가지 환경에서 시험을 진행하였다. 저온 환경의 경우 KR 규정[13] 중 winterization E3(t)에 따라 -50°C로 설정하였고 고온 환경의 경우 국가법령(선박안전법) 중 선체 보호 도장에 따라 50°C로 설정하였다[14]. 시편의 온도 환경에 따른 인장강도를 확인하기 위해 MTDI사의 저온 챔버를 사용하여 -50°C에서 50°C까지 시험 환경을 유지하였다. 이때 시편이 설정한 온도 환경과 동일한 온도에 도달할 수 있도록 30분의 시간 동안 설정 온도 환경에 노출시켰다.

2.3 인장 시험

인장 시험은 ASTM D3039에 따라 수행하였으며 시험 장

비는 만능재료시험기(Instron 5582)를 사용하였다. 인장 하중이 작용할 때 시편의 변형률을 측정하기 위해 Instron사의 2축 스트레인 게이지 Gauge length 50 mm Extensometer를 시편에 부착하였다. 인장 속도는 2 mm/min으로 진행하였으며 시험은 최대 하중의 70% 하중으로 감소할 때까지 진행하였다.

3. 시험 결과

3.1 온도별 비교

Table 2에 인장강도, 변형률과 탄성계수에 대한 결과값을 각각의 온도 환경에 따라 정리하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 모든 복합재료 시편에 대해 상온과 비교하였을 때,

Table 2. Result of tensile strength and strain

		Carbon + Onyx	Carbon + Nylon	HSHT glass + Onyx	HSHT glass + Nylon
Room Temperature	Tensile Strength (MPa)	168.6	169.7	127.0	131.3
	Strain (%)	5.79	5.82	11.81	14.00
	Tensile Modulus (GPa)	2.91	2.92	1.08	1.07
High Temperature	Tensile Strength (MPa)	137.7	87.4	117.1	115.9
	Strain (%)	4.36	4.00	11.82	11.33
	Tensile Modulus (GPa)	2.79	2.19	0.99	1.02
Low Temperature	Tensile Strength (MPa)	176.6	173.3	203.9	194.9
	Strain (%)	4.60	4.91	15.53	14.86
	Tensile Modulus (GPa)	3.84	3.53	1.31	1.31

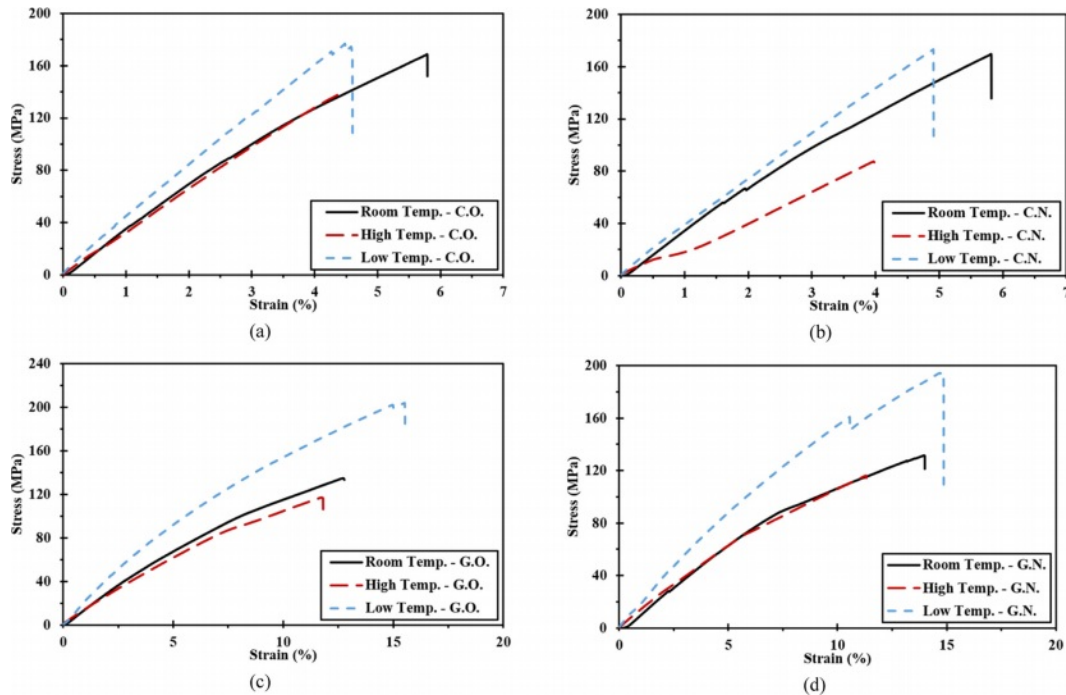


Fig. 3. Stress-Strain Curve by specimen type: (a) C.O. (Carbon + Onyx), (b) C.N. (Carbon + Nylon), (c) G.O. (HSHT glass + Onyx), (d) G.N. (HSHT glass + Nylon)

고온 환경에서 인장강도가 감소함을 확인하였다. 그리고, 저온 환경에서 인장 시험 결과는 상온과 비교하여 인장강도가 증가하는 경향을 보였다. 탄소 섬유/오닉스 복합재료의 인장강도 경우 상온 대비 저온 환경에서 인장강도가 4.76% 증가하였으며 고온 환경에서 18.34% 감소하였다. 탄소 섬유/나일론 복합재료의 인장강도는 상온 대비 저온 환경에서 2.15% 증가하였고 고온 환경에서 48.51% 감소하였다. 고강도고온 유리섬유/오닉스 복합재료의 경우 인장강도가 상온 대비 저온 환경에서 60.51% 증가하였으며 고온 환경에서 7.82% 감소하였다. 또한, 고강도고온 유리섬유/나일론의 경우 인장강도가 상온 대비 저온 환경에서 48.44% 증가하였고 고온 환경에서 11.72% 감소하였다. 일반적으로 고

온 환경의 인장 시험에서 섬유/오닉스 시편보다 섬유/나일론 시편이 낮은 인장강도 값을 보이는 것을 확인하였다. 이는 나일론의 열변형온도(41°C)가 오닉스의 열변형온도(145°C)보다 낮아 나일론의 변형이 빠르게 시작되어 인장강도가 저하되는 것으로 판단된다[15]. 그리고, 각 복합재료의 강성의 경우 강도와 유사하게 상온 대비 고온에서는 감소하고, 저온에서 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 저온, 상온, 고온 환경 모두에서 카본 복합재료가 고강도고온 유리섬유 복합재료에 비해 우수한 강도와 강성을 보이는 것을 확인하였다. 특히, 고온 환경의 경우 카본/나일론 복합재료는 카본/오닉스 복합재료에 비해 낮은 강도 및 강성 값을 보여주는데, 이는 탄소섬유와 나일론간 계면 결합력이 낮아 나일론에서 탄소섬유가 이탈된 것으로 판단된다[16]. 저온 환경의 경우 고온 환경과 달리 상온 환경에서의 시험 결과와 유사한 경향을 보임으로써, 저온 환경에서는 3D 프린트 복합재료 시편의 계면 결합력은 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

3.2 파손형상 분석

ASTM D3039에서는 파손 형상을 Table 3-5와 같이 규정하였다. Table 3-5에 근거하여 분석한 파손 형상을 Table 6에 정리하였다. Fig. 4-7은 각 시편의 저온, 상온, 고온 환경에서의 인장 시험 결과를 통해 분석한 파손 형상을 나타낸다. 탄소섬유 시편의 경우 저온과 상온 환경에서 Lateral failure

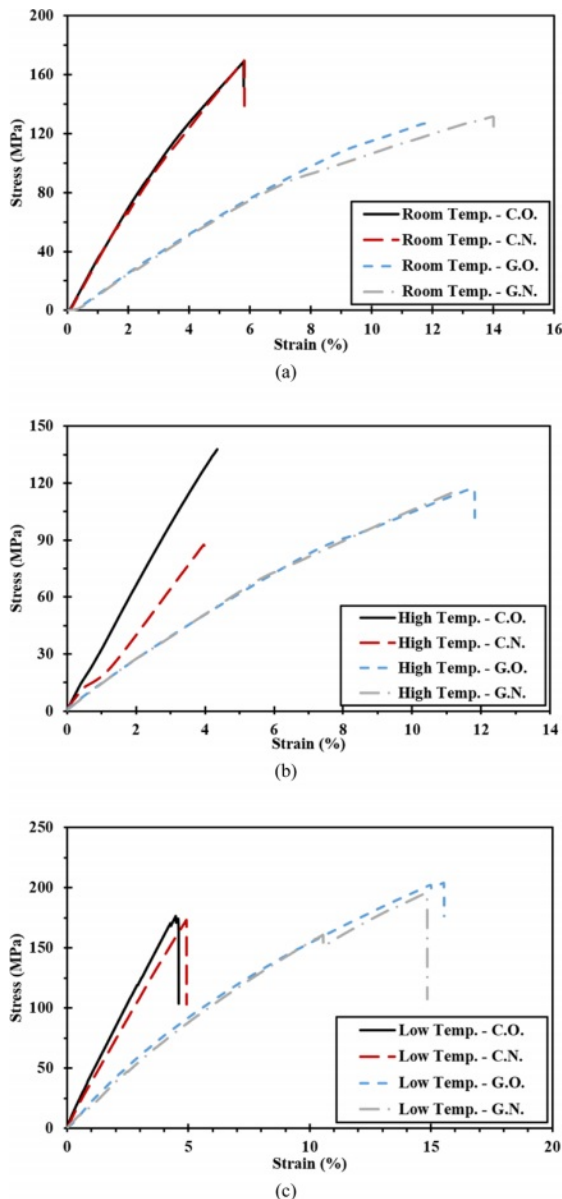


Fig. 4. Stress-Strain Curve by temperature: (a) Room temperature, (b) High temperature, (c) Low temperature

Table 3. First Character: Failure Type

Failure Type	Code
Angled	A
Edge Delamination	D
Grip/tab	G
Lateral	L
Multi-mode	M(xyz)
Long. Splitting	S
eXplosive	X
Other	O

Table 4. Second Character: Failure Area

Failure Area	Code
Inside grip/tab	I
At grip/tab	A
<1W from grip/tab	W
Gage	G
Multiple areas	M
Various	V
Unknown	U

Table 5. Third Character: Failure Location

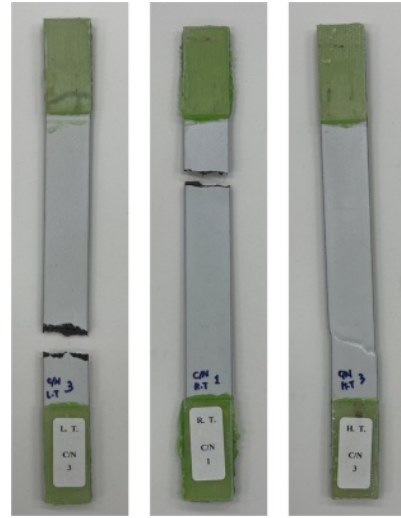
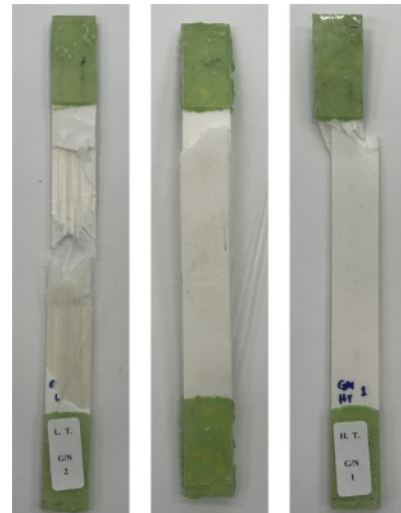
Failure Location	Code
Bottom	B
Top	T
Left	L
Right	R
Middle	M
Various	V
Unknown	U

Table 6. Failure mode of specimen

	Carbon + Onyx	Carbon + Nylon	HSHT glass + Onyx	HSHT glass + Nylon
Low Temp.	LGT	LGB	XGM	XGM
Room Temp.	LGT	LGT	M(D+L)GM	M(D+L)GT
High Temp.	LGT	AGB	M(D+L)GM	AGT

**Fig. 5.** Failure mode of C.O. (Carbon + Onyx)

type의 파손 형상을 보였다. 고온 환경에서의 파손 형상의 경우 C.O. 시편은 저온 및 상온 환경에서의 파손 형상과 유사하였으나 C.N. 시편의 경우 Angled failure type이 나타났다. 고강도고온 유리섬유 시편의 failure type의 경우 저온 환경에서 eXplosive가 나타났으며 상온 환경에서는 Multi-mode(Edge Delamination + Lateral)가 나타났다. 고온 환경의 경우, G.O. 시편에서는 상온 환경과 동일한 파손 형상을 보였으나 G.N. 시편의 경우 Angled failure type이 관찰되었다. 기본 복합재료 중 나일론이 포함된 시편의 경우 오닉스가 포함된 시편과 다른 파손 형상이 나타났다. 이는 나일론의 열변형온도가 오닉스에 비해 낮기 때문에 발생한 것으로 판단된다[15].

**Fig. 6.** Failure mode of C.N. (Carbon + Nylon)**Fig. 7.** Failure mode of G.O. (HSHT glass + Onyx)**Fig. 8.** Failure mode of G.N. (HSHT glass + Nylon)

4. 결 론

본 연구에서는 온도환경이 3D 프린트 복합재료의 기계적 물성 미치는 영향을 확인하기 위해 탄소섬유/오닉스, 탄소섬유/나일론, 고강도고온 유리섬유/오닉스, 고강도고온 유리섬유/나일론의 총 4가지 복합재 시편을 제작하여 각각 저온, 상온, 고온 환경에서의 기계적 물성을 확인하였다. 시험 결과 모든 복합재료에서 상온 대비 고온에서는 인장강도가 감소하고 저온에서는 인장강도가 증가함을 확인하였다. 그리고 저온, 상온, 고온 환경 모두에서 카본 복합재료가 고강도고온 유리섬유 복합재료에 비해 우수한 강도와 강성을 보이는 것을 확인하였다. 파손 형상의 경우 탄소섬유 복합재료에서 고온 환경에 노출된 나일론의 경우 Angled failure type이 관찰되었고 이 외의 시편에서 Lateral failure type이 관찰되었다. 고강도고온 유리섬유 복합재료의 파손 형상은 저온 환경에서는 eXplosive failure type이 상온 환경에서는 Multi failure type이 나타났다. 고온 환경에서의 오닉스의 경우 상온 환경과 유사한 경향을 보였으나 나일론의 경우 Angled failure type을 관찰할 수 있었다. 이를 통해 다양한 온도 환경에 따라 여러 종류의 파손 현상이 발생되는 것을 확인하였다. 여러 온도 환경을 고려해 볼 때 우수한 강도와 강성을 갖는 탄소섬유/오닉스가 소재 안전성 측면에서 선박 및 해양 구조물에 가장 적합한 소재로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원과 산업기술평가관리원의 지원[RS-2022-00143053, 안전기반 40인승 350kW급 수소추진선박 설계·해석·건조단계 엔지니어링·실증 기술개발]을 받아 실시된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, H.K., Nam, K.W., and Ahn, S.H., "Strength Characteristics of FRP Composite Materials for Ship Structure", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 4, 2013, pp. 45-54.
- Tawfik, B.E., Leheta, H., Elhewy, A., and Elsayed, T., "Weight Reduction and Strengthening of Marine Hatch Covers by Using Composite Materials", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 9, No. 2, 2017, pp. 185-198.
- Oh, E.Y., Lee, J.W., and Suhr, J.W., "3D Printable Composite Materials: A Review and Prospective", *Composite Research*, Vol. 31, No. 5, 2018, pp. 192-201.
- Jeong, S.Y., Kang, K.J., and Jang, J.H., "A Review of Winterization Trend for Vessels Operating in Ice-covered Waters", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 56, No. 2, 2019, pp. 135-142.
- International Maritime Organization. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk: IGC Code. IMO Publishing, 1993.
- Kwon, W.N., Kim, S.S., Kim, Y.J., and Woo, N.S., "Material Development for Resource Development in Extreme Regions", *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 54, No. 11, 2014, pp. 42-45.
- MarketsandMarkets, Advanced Composites Market, 2020.
- Torabizadeh, M.A., "Tensile, Compressive and Shear Properties of Unidirectional Glass/epoxy Composites Subjected to Mechanical Loading and Low Temperature Services", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 20, No. 4, 2013, pp. 299-309.
- Ou, Y.F., and Zhu, D.J., "Tensile Behavior of Glass Fiber Reinforced Composite at Different Strain Rates and Temperatures", *Construction and Building Materials*, Vol. 96, No. 2, 2015, pp. 648-656.
- Kubo, S., Okubo, K., and Fujii, T., "Characteristic Behaviors of CFRP and GFRP at Cryogenic Temperature under Static and Cyclic Loadings", *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol. 85, No. 1, 2006, pp. 179-188.
- Standard, A. S. T. M. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D3039/DM, 3039, 2008.
- Woo, I.Y., and Lyu, M.Y., "Variations in the Tensile Strength in Material Extrusion-type 3D Printed Specimens for Various Tool Paths", *POLYMER-KOREA*, Vol. 44, No. 6, 2020, pp. 769-775.
- KR, Guidance for Ships for Navigation in Ice, 2022.
- Ministry of Oceans and Fisheries, ENFORCEMENT DECREE OF THE SHIP SAFETY ACT.
- Markforged, MATERIAL DATASHEET CompositesV5.2.
- Choi, W.K., Kim, B.J., Min, B.G., Bae, K.M., and Park, S.J., "Effects of Sizing Treatment of Carbon Fibers on Mechanical Interfacial Properties of Nylon 6 Matrix Composites", *Elastomers and Composites*, Vol. 45, No. 1, 2010, pp. 2-6.