



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

3D 프린트 복합재료의
선박/해양구조물 적용을 위한
기계적 성능 연구

Study of mechanical performance of
3D printed composite material
for ship/marine structure

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
김도현

3D 프린트 복합재료의
선박/해양구조물 적용을 위한
기계적 성능 연구

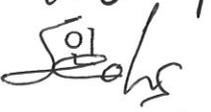
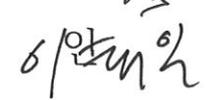
지 도 교 수 서 형 석

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2023년 8월

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
김 도 현

김도현의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원	유	정	수	
심사위원	서	형	석	
심사위원	이	태	일	

울 산 대 학 교 대 학 원

2023년 8월

3D 프린트 복합재료의 선박/해양구조물 적용을 위한 기계적 성능 연구

김도현

울산대학교 대학원 조선 및 해양공학과

국문 요약

최근 국제해사기구의 환경 규제에 따라 조선 및 해양 산업에서 친환경·스마트 선박에 관한 관심이 높아지고 있다. 특히, 경량화를 통한 연료 효율을 높이기 위해 관련 복합재료를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 제작하기 쉽고, 빠른 생산 공정의 장점이 있는 스마트 소재인 3D 프린트 복합재료에 관한 관심이 높아지고 있다.

3D 프린트 복합재료의 조선 및 해양 구조물 적용을 위해서 3D 프린트 소재의 구조해석 데이터와 3D 프린트 복합재료의 해양환경에서의 기계적 성능에 관한 연구가 필요하다. 다양한 해양환경 중 염수 환경에 대한 영향은 소재의 적용을 위해 필수적으로 연구될 필요가 있다. 그리고 3D 프린트 복합재료의 경우 용접을 이용하여 다른 금속 소재의 구조물과 연결할 수 없어 기계적 체결 방식을 사용해야 하므로 기계적 체결에 관한 연구 또한 필요하다.

이에 본 연구에서는 염수 환경에 노출된 3D 프린트 복합재료 시편의 기계적 성능을 평가하고, 기계적 체결 방식에 대한 강도 평가를 실험적으로 수행하였다. 또한 3D 프린트 복합재료 구조물의 기계적 강도를 예측할 수 있는 유한요소해석 모델을 개발하였다. 염수 환경의 영향 및 기계적 체결 강도 평가와 유한요소해석 모델을 개발하기 위해 3D 프린트를 활용하여 복합재료 시편을 제작하였으며 실험의 경우 만능재료시험기를 활용하여 제작된 시편의 기계적 시험을 수행하였다. 시험 진행 후 각각 염수 환경의 영향에 따라 변화된 인장 강도와 원공 노치의 직경에 따른 기계적 체결 강도를 비교/분석하였다. 또한 시험평가 후 시편의 파손 형상을 확인하여 3D 프린트 복합재료의 기계적 강도와 파손 형상의 관계를 분석하였다.

목차

국문 요약	i
목차	ii
그림 목차	iv
표 목차	vii
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
제2장 해양환경에서의 3D 프린트 복합재료 시편의 wall layer에 따른 기계적 강도 평가	4
2.1 실험 시편 제작	4
2.1.1 3D 프린트 복합재료 시편 제작 방식	4
2.1.2 시편 치수 및 제작	5
2.2 염수 분무 시험	7
2.2.1 염수 분무 시험 장치 및 조건	7
2.2.2 시험 결과	8
2.3 인장 시험	11
2.3.1 인장 시험 장치 및 조건	11
2.3.2 시험 결과	11
2.4 염수 분무 시험에 따른 인장 시험 결과 비교	16
2.4.1 염수 흡수율과 인장 강도의 관계	16
2.4.2 파손 형상	18
제3장 선/후 가공을 통해 제작된 원공 노치를 갖는 3D 프린트 복합재료 시편의 핀(Pin) 체결 강도 평가	21
3.1 실험 시편 제작	21
3.1.1 시편 치수	21
3.1.2 3D 프린트 복합재료 시편 제작	22
3.2 실험 구성	23
3.2.1 이중 체결 픽스처(Double-lab fixture) 및 핀(Pin)	23
3.2.2 인장 시험 장치 및 조건	24
3.3 기계적 체결 강도 평가	24
3.3.1 기계적 체결 강도	24

3.3.2 파손 형상	30
제4장 3D 프린트 물성 시험 시편의 유한요소해석 모델 개발	33
4.1 유한요소해석 모델	33
4.1.1 모델 치수	33
4.1.2 유한요소모델	35
4.2 유한요소해석 조건	36
4.2.1 물성 정보 및 파손 기준 조건	36
4.2.2 경계/하중 조건	37
4.3 유한요소해석 결과	39
제5장 결론	43
참고문헌	44
Abstract	47

그림 목차

Figure 1.1 Market Size and Outlook of 3D Printing Materials	1
Figure 2.1 Schematic of FDM 3D print method	4
Figure 2.2 Dimension of 3D printed specimen	5
Figure 2.3 Image of Markforged S/W Eiger: (a) Type 1, (b) Type 2	6
Figure 2.4 Specimen cross-section: (a) Type 1, (b) Type 2	6
Figure 2.5 Test machine: Salt-water spray tester	7
Figure 2.6 Microscopic image of specimen's side: (a) Type 1 and (b) Type 2 before salt-fog test, (c) Type 1 and (d) Type 2 after 30 days salt-fog test	9
Figure 2.7 Comparison of salt-water absorption rate	10
Figure 2.8 Test machine: Universal Testing Machine	11
Figure 2.9 Comparison of stress-strain curve by exposure time (a) Type 1, (b) Type 2	13
Figure 2.10 Comparison of stress-strain curve by type (a) 0 Days, (b) 15 Days, (c) 30 Days	14
Figure 2.11 Comparison of tensile properties change rate (a) Strength, (b) Modulus	15
Figure 2.12 Relationship between salt-water absorption rate and tensile strength	17
Figure 2.13 Schematic of expansion of crack and void	18
Figure 2.14 Tensile failure mode of 3D printed specimen	20
Figure 3.1 Schematic of 3D printed bearing specimen	21
Figure 3.2 Markforged S/W Eiger image: Printing direction of Core laminate (a) 0°, (b) ±45°, (c) 90°	22
Figure 3.3 Schematic of double-lab fixture	23
Figure 3.4 Experimental set-up: (a) Schematic of the fastened specimen, (b) Specimen installed in UTM	24
Figure 3.5 Load-Displacement curve of Type 1-D5 specimen	25
Figure 3.6 Load-Displacement curve of Type 1-D6 specimen	25
Figure 3.7 Load-Displacement curve of Type 1-D8 specimen	25

Figure 3.8 Load-Displacement curve of Type 1-D10 specimen	26
Figure 3.9 Load-Displacement curve of Type 2-D5 specimen	26
Figure 3.10 Load-Displacement curve of Type 2-D6 specimen	26
Figure 3.11 Load-Displacement curve of Type 2-D8 specimen	27
Figure 3.12 Load-Displacement curve of Type 2-D10 specimen	27
Figure 3.13 Load-Displacement curve of Type 1-0° specimen	28
Figure 3.14 Load-Displacement curve of Type 1-±45° specimen	28
Figure 3.15 Load-Displacement curve of Type 1-90° specimen	28
Figure 3.16 Load-Displacement curve of Type 2-0° specimen	29
Figure 3.17 Load-Displacement curve of Type 2-±45° specimen	29
Figure 3.18 Load-Displacement curve of Type 2-90° specimen	29
Figure 3.19 Bearing test failure mode	30
Figure 3.20 Failure mode of 3D printed bearing specimen(0°)	31
Figure 4.1 Dimension of tensile(0°) test model	33
Figure 4.2 Dimension of tensile(90°) test model	33
Figure 4.3 Dimension of shear(±45°) test model	33
Figure 4.4 Dimension of plastic material tensile test model	34
Figure 4.5 Finite element model of tensile(0°) test model	35
Figure 4.6 Finite element model of tensile(90°) test model	35
Figure 4.7 Finite element model of shear(±45°) test model	35
Figure 4.8 Finite element model of plastic material tensile test model	35
Figure 4.9 Load/Boundary conditions	38
Figure 4.10 Comparison of stress-strain curve between experimental results and finite element analysis results of tensile test model(0°)	39
Figure 4.11 Comparison of stress-strain curve between experimental results and finite element analysis results of tensile test model(90°)	40
Figure 4.12 Comparison of stress-strain curve between experimental results and finite element analysis results of shear test model(±45°)	40
Figure 4.13 Comparison of stress-strain curve between experimental results and finite element analysis results of tensile test model for plastic model	41
Figure 4.14 Comparison of failure mode between experimental results and	

	finite element analysis results of tensile test model(0°)	41
Figure 4.15	Comparison of failure mode between experimental results and finite element analysis results of tensile test model(90°)	42
Figure 4.16	Comparison of failure mode between experimental results and finite element analysis results of shear test model($\pm 45^\circ$)	42

표 목차

Table 2.1 Material properties	5
Table 2.2 Laminate information of 3D printed specimen	6
Table 2.3 Summary of water absorption critical period	8
Table 2.4 Result of salt-water absorption rate	9
Table 2.5 Experimental result	16
Table 2.6 Tensile test failure code	19
Table 3.1 Summary of dimension and W/D, E/D	21
Table 3.2 Laminate information of 3D printed bearing specimen	22
Table 3.3 Failure mode of 3D printed bearing specimen	32
Table 4.1 Laminate information of carbon fiber filament model	34
Table 4.2 Laminate information of other reinforcement filament model	34
Table 4.3 Laminate information of plastic filament model	35
Table 4.4 Material properties for finite element analysis	36
Table 4.5 Input data for Tsai-Wu setup	37
Table 4.6 Dimension of tab for properties test	38

제 1장 서론

1.1 연구배경

최근 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)의 환경 규제에 따라 세계적으로 친환경 에너지 자원과 신재생 에너지 자원에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 이에 따라 해저 에너지 및 자원에 대한 관심이 높다. 해저 자원 탐사 및 개발을 위한 작업 시 인간의 안전성을 위해 무인이동체의 활용이 증가하고 있다[1-4]. 이에 따라 해양환경에서 운용되는 무인이동체는 염수 환경 및 수분 환경에 대한 저항성을 반드시 갖추어야 한다.

염수 환경 및 수분 환경에 대한 저항성을 가지는 복합재료 산업의 발전과 함께 고성능 3D 프린트 복합재료는 매력적인 소재로 주목받고 있다. 3D 프린트 복합재료는 전통 복합재료에 비해 경제적 생산이 용이하며, 복잡한 형상에 대한 설계 및 제작이 수월하다. 이에 따라 3D 프린트 복합재료의 특징적인 생산 품질의 일관성, 연결구조물 감소에 대한 용이점, 구조 강도 만족 등으로 transportation vehicle에 대한 적용연구를 수행하고자 하는 움직임이 보인다. 반면, 일반적인 3D 프린트 구조물은 플라스틱과 같은 소재만을 사용할 수 있었다. 이에 따라 구조물의 기계적 강도 측면에서 한계가 있었다. 이에 따라 기계적 강도 측면의 단점을 해결하기 위해 금속, 세라믹, 고강도 강화재 등 다양한 소재를 활용한 고성능 3D 프린트 기술이 개발되었으며 Figure 1.1과 같이 다양한 산업에서 활발히 사용하기 위한 움직임을 보인다.

(단위: 백만 달러)

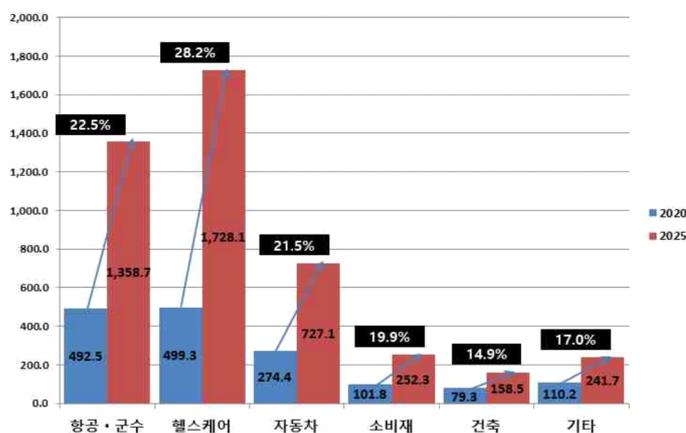


Figure 1.1 Market size and outlook of 3D printing materials [5]

기계적 강도를 만족하기 위해 연속섬유를 함유하여 제작된 고성능 3D 프린트 복합재료는 일반적인 3D 프린트 구조물의 기계적 강도 측면의 단점을 보완한 할 수 있다.

- Huimin Li 등[6]은 진공상태에서 printing 된 continuous carbon fiber reinforced PLA composite의 기계적 성능을 확인하기 위해 굽힘 시험을 수행하였다. 진공상태에서 3D printing을 진행하면 기공의 발생 정도가 13.93%에서 4.18%로 감소하며, 굽힘 강도와 굽힘 계수는 각각 24.51%, 8.35% 증가함을 확인하였다.
- Altug 등[7]은 3D printing 된 Continuous fiber-reinforced thermoplastic composites (CFRTP)의 기계적 성능을 평가하기 위해 서로 다른 fiber fraction을 갖는 시편을 제작하였다. Fiber fraction이 22%에서 40%로 증가할 때 인장 강도와 굽힘 강도는 각각 60.61%, 21.74% 증가하였다.
- Rashid 등[8]은 3D printed short carbon fiber-reinforced composite의 infill 형상 및 밀도에 따른 인장 강도를 평가하였다. 인장 시험 결과 hexagonal pattern을 갖는 시편이 동일 density를 갖는 다른 pattern에 비해 중량 대비 높은 기계적 성능을 확인하였다.

또한 해양환경에서 구조물을 운용하기 위해서는 해양환경에 대한 내구성을 가지고 있어야 한다. 대표적인 3D 프린터 회사인 Markforged 사에서는 시편이 수분 환경에 노출되는 경우를 대비하여 구조물로의 수분 침투를 방지할 수 있는 wall layer를 두 층 이상 포함한 제작을 권장한다[9]. 이때 wall layer의 경우 carbon fiber와 같은 연속섬유가 아닌 플라스틱 소재를 사용하기 때문에 기계적 성능 향상을 기대할 수 없다. 즉, wall layer를 갖는 시편의 경우 wall layer를 포함하지 않은 시편에 비해 FVF(Fiber Volume Fraction)이 감소한다. FVF의 감소는 섬유가 차지하는 비율의 감소를 의미한다. 따라서 wall layer는 구조물의 기계적 성능을 감소시키기 때문에 wall layer를 포함한 구조물 제작은 경제적이지 못한 설계로 판단할 수 있다. 하지만 wall layer는 Markforged 사에서 언급한 바와 같이 염수 환경과 같은 환경 영향에 대한 영향을 감소시킬 수 있으므로 설계에 필요한 구조물이다. 염수 환경에 노출된 복합재료 시편의 기계적 성능 변화 및 염수 흡수율을 확인하기 위해 관련 선행 연구가 수행되었다.

- Wei 등[10]은 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)와 BFRP(Basalt Fiber Reinforced Plastic)를 6 wt.% 소금의 인공 해양환경에 노출시킨 후 0, 10, 20, 30, 60, 90일마다 무게를 계산하여 염수 흡수율을 계산하였다. 염수 흡수율은 약 30일부터 수렴함을 확인하였으며, 염수 환경에 노출되지 않은 시편과 비교하였을 때 30일 동안 염수 환경에 노출된 GFRP와 BFRP 시편의 인장 강도는 각각 약 20%, 23% 감소함을 확인하였다. 이는 염수 흡수에 의해 계면의 부식으로 인해 발생하였다.
- Libo 등[11]은 flax fabric/epoxy composites 시편을 염수 환경에 1년간 노출시킨 후 인장/굽힘 강도 및 계수를 확인하였다. 인장 강도 및 계수는 각각 28.3%, 27.1% 감소하였으며, 굽힘 강도 및 계수는 각각 18.3%, 23.5% 감소하였다. 이는 계면의 접착강도 저하로 인해 debonding 현상 발생했기 때문이다.

선박 및 해양구조물에 3D 프린트 복합재료를 적용하기 위해서는 해양환경에 대한 내구성뿐만 아니라 구조물의 연결 방법을 고려해야 한다. 일반적으로 선박 및 해양 구조물에 적용되는 용접 공법은 3D 프린트 복합재료에 적용하기 적절한 방법은 아니므로 구조물의 효율적인 결합을 위해 기계적 체결방식이 주로 이용된다. 기계적 체결방식을 사용하게 되면 체결을 위한 원공에 응력 집중 현상이 발생하게 되므로 구조적으로 취약하다. 특히 원공의 직경과 같은 기하학적 형상에 영향을 많이 받게 된다. 기계적 체결방식은 많은 산업에서 활용되고 있으며 관련한 많은 연구가 진행되어 왔다.

- Othman 등[12]은 GFRP 복합재료 시편의 기하학적 영향을 파악하기 위해 실험을 수행하였다. 실험 결과 하중의 증가에 따라 시편의 파손을 확인하였다. 기하학적 매개변수인 원공 직경(D), 시편의 폭(W), 원공의 중심으로부터 시편의 끝단까지의 거리(E)에 따라 시편의 파손 형상에 영향을 미치는 것을 확인하였다. W/D가 낮은 경우 인장 파손 형상을 보이며 E/D가 낮은 경우 전단 파손 형상을 보였다. 이를 통해 일정 기하학적 매개변수 임계점을 지나는 경우 안정적인 베어링 파손 형상이 보임을 확인하였다.
- D.U. Kim 등[13]은 CFRP 시편과 GFRP 시편을 활용하여 기하학적 영향에 따른 시편의 지압 강도에 대해 연구하였다. 실험 결과 원공 직경에 상관없이 CFRP가 GFRP보다 30% 이상 우수한 강도를 가짐을 확인하였다. 또한 W/D 감소에 따라 최대 지압 하중이 증가함을 확인하였다.
- Calabrese 등[14]은 기하학적 매개변수에 따라 변화하는 파손 형상을 확인하고 failure map을 작성하기 위해 연구를 수행하였다. 이를 통해 원공 직경의 증가에 따라 지압응력은 감소함을 확인하였고, 원공 중심으로부터 끝단까지의 거리가 증가하는 경우 지압응력이 선형적으로 증가하다가 일정 임계점 이후 수렴하는 경향을 확인하였다.

3D 프린트 복합재료의 기계적 강도에 대한 연구와 복합재료의 해양환경 영향 및 기계적 체결부에 미치는 기하학적 영향에 대한 연구가 수행되었다. 하지만 3D 프린트 복합재료의 해양환경 영향 및 기계적 체결 강도에 대한 연구와 3D 프린트 복합재료의 유한요소해석 모델 개발에 대한 연구는 부족하다. 이에 본 연구에서는 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 기계적 강도가 확보된 3D 프린트 복합재료를 선박 및 해양 구조물에 적용하기 위해 대표적인 해양환경인 염수 환경에 노출된 3D 프린트 복합재료 시편의 wall layer 유무에 따른 기계적 강도 평가
- 구조물의 효율적인 연결을 위해 3D 프린트로 제작된 복합재료 시편의 기계적 체결 강도 평가
- 3D 프린트 복합재료를 활용하여 기계적 강도에 대한 유한요소해석 모델 개발

제 2장 해양환경에서의 3D 프린트 복합재료 시편의 wall layer에 따른 기계적 강도 평가

2.1 실험 시편 제작

2.1.1 3D 프린트 복합재료 시편 제작 방식

3D 프린트의 방식으로는 FDM(Fused Deposition Modelling), DLP(Digital Light Processing), SLS(Selective Laser Sintering), SLA(Stereo Lithography Apparatus) 등 다양한 방식이 있다. 그중 FDM 방식은 Figure 2.1과 같이 continuous filament를 이용하여 재료를 적층하는 방식이다. Continuous filament가 가열된 nozzle로 들어가 반액체 상태로 Print bed에 적층된다. Print bed는 filament의 급격한 냉각을 방지하기 위하여 nozzle과 마찬가지로 일정온도로 가열되어 있다. Filament의 적층을 위해 print bed는 Z축 방향으로 움직이며, nozzle은 프린팅 방향에 따라 XY 평면에서 움직이며 구조물을 제작한다. FDM 방식을 사용하여 3D print 복합재료 구조물을 제작하는 경우 섬유 연속성이 존재하여 다른 3D print 방식에 비해 우수한 기계적 성능을 갖는다. 대표적인 연속섬유 3D 프린트 복합재료 제작업체인 Markforged 사에서는 carbon, glass, HSHT glass, kevlar 등을 활용한 연속섬유 3D 프린트 복합재료 구조물을 제작한다. 본 연구에서는 시편 제작을 위해 carbon fiber filament와 onyx filament를 이용하였다. 시편 제작에 사용된 carbon fiber filament와 onyx filament의 물성 정보는 Table 2.1에 요약되어 있다[15].

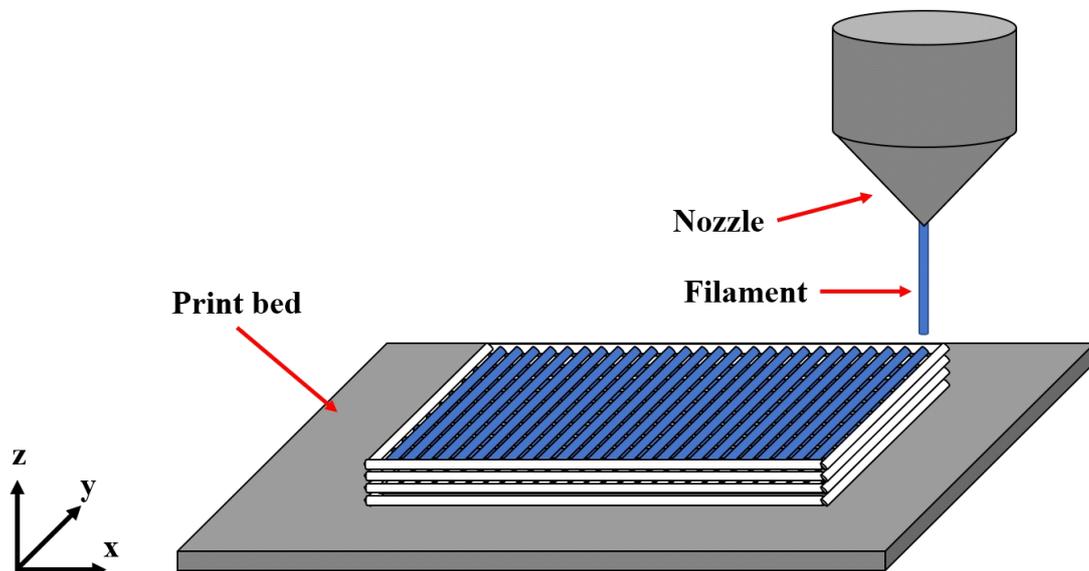


Figure 2.1 Schematic of FDM 3D print method

Table 2.1 Material properties [15]

Property	Carbon fiber	Onyx
Tensile modulus (GPa)	60	2.4
Tensile strength (MPa)	800	40
Tensile strain (%)	1.5	25
Test (ASTM standard)	D3039	D638

2.1.2 시편 치수 및 제작

복합재료 시편은 ASTM D3039 standard[16]에 따라 제작하였으며 시편의 형상 및 치수 정보를 Figure 2.2에 표기하였다. FDM 방식의 3D 프린터를 이용하여 시편을 제작하는 경우 시편의 free edge에 표면 마감과 섬유 배열을 위해 wall layer가 필수적으로 제작된다. 이때 3D 시편의 프린팅 시 발생하는 wall layer의 유용성과 기계적 거동의 차이를 확인하기 위해 wall layer가 존재하는 시편(Type 1)과 후가공을 통해 wall layer를 제거한 시편(Type 2) 두 종류로 시편을 구분하여 9개씩 제작하였다. Type 1과 Type 2 시편의 전체 길이(L)는 250mm, 폭(W)은 15mm이며, 두께(T)는 2mm, 탭의 길이(L_{tab})는 56mm로 제작하였다. Table 2.2에 보이는 바와 같이 3D 프린트 복합재료 시편의 프린팅 방향은 하중 방향과 동일한 0도 방향으로, 총 16층으로 적층하였다. Type 1 시편에 제작된 wall layer는 1개 층으로 free edge에 0.4mm씩 제작되었다. Type 2 시편의 가공 전 폭을 15.8mm 이상으로 프린팅한 후 free edge에 제작된 wall layer의 폭인 0.4mm 만큼씩을 water-jet 후가공을 통해 Figure 2.3과 같이 제작하였다. 제작된 시편의 단면은 Figure 2.4와 같다. 단면을 확인하였을 때, carbon fiber filament가 차지하는 비율(FVF)이 다를 수 있다. Type 1의 경우 약 47%의 FVF를 가지며 type 2의 경우 50%의 FVF를 갖는다.

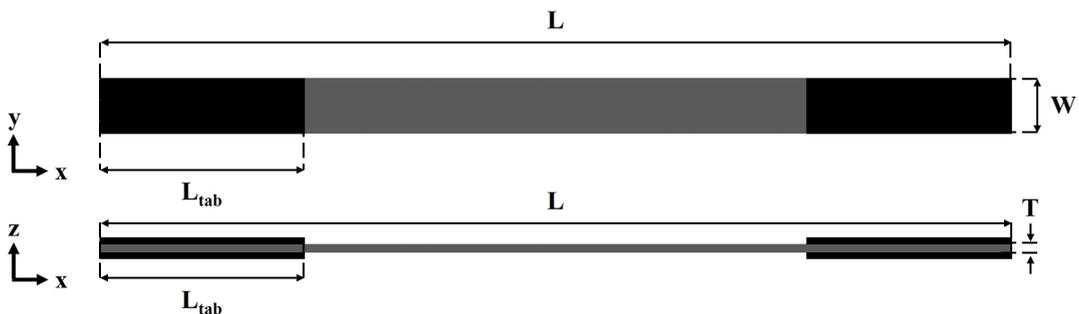


Figure 2.2 Dimension of 3D printed specimen

Table 2.2 Laminate information of 3D printed specimen

Type	Material	Printing direction	Total layer NO.	Total layer thickness (mm)
Type 1 (With wall layer)	Onyx	$[\pm 45^\circ]_2$	4	0.5
	Carbon fiber	$[0^\circ]_8$	8	1.0
	Onyx	$[\pm 45^\circ]_2$	4	0.5
	Onyx (Wall layer)	-	16	2.0
Type 2 (Without wall layer)	Onyx	$[\pm 45^\circ]_2$	4	0.5
	Carbon fiber	$[0^\circ]_8$	8	1.0
	Onyx	$[\pm 45^\circ]_2$	4	0.5

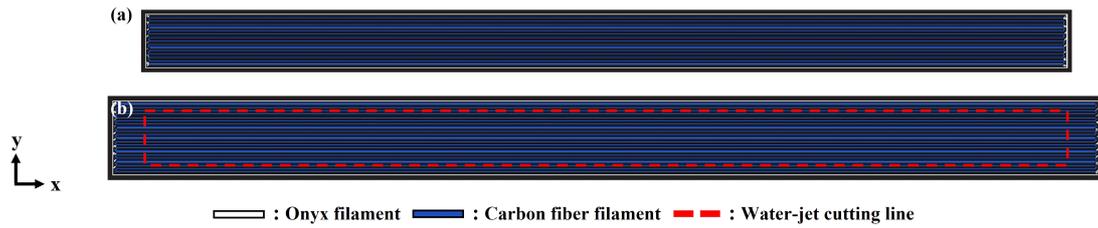


Figure 2.3 Image of Markforged S/W Eiger: (a) Type 1, (b) Type 2

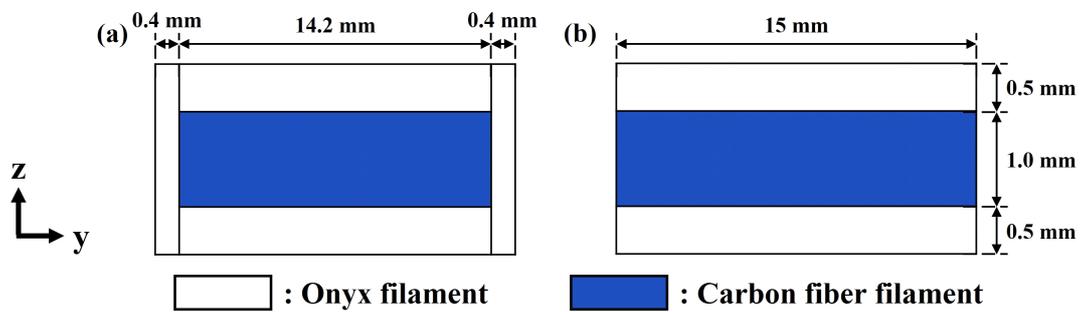


Figure 2.4 Specimen cross-section: (a) Type 1, (b) Type 2

2.2 염수 분무 시험

2.2.1 염수 분무 시험 장치 및 조건

3D 프린트 복합재료 시편에 해양환경이 미치는 영향을 확인하기 위해 제작된 3D 프린트 복합재료 시편을 대표적인 해양환경인 염수 환경에 노출시켰다. 염수 분무 시험 장비는 Figure 2.5와 같이 CORETECH KOREA 사의 CT-ST 600 장비를 사용하였으며, 염수 분무 시험은 ASTM B117 standard[17]에 따라 수행하였다. 염수 분무 시험에 사용된 용액은 $5\pm 1\%$ 의 NaCl 농도(6.5~7.2 pH 범위 이내)를 가질 수 있도록 제조하였다. 시편은 염수 분무 환경 chamber에서 염수 환경에 노출되었으며 chamber의 내부 온도는 35 ± 2 °C로 유지하였다.

타당한 염수 분무 기간의 선정을 위해 염수 환경에 노출된 기존 복합재료 시편의 수분 흡수율을 분석하였다. Table 2.3에 보이는 바와 같이 다양한 복합재료 시편의 수분 흡수율의 결과를 확인해 봤을 때, 임계 기간까지 염수 흡수율은 증가하는 경향을 보였으며, 임계 기간 이후의 경우 염수 흡수율이 수렴하는 경향을 보였다. 기존 연구의 경향을 확인하였을 때, 청수/염수 환경 노출 기간이 증가할수록 수분 흡수율이 지속적으로 증가하는 것이 아닌 일정 임계 기간에 도달했을 때 수분 흡수율이 수렴하는 것을 알 수 있다[10, 18-24]. Table 2.3에 정리된 임계 기간을 확인하였을 때 수분 흡수는 10~30일 이내에 가장 활발하게 발생하는 것으로 확인되므로 15일, 30일 염수 환경 노출 기간은 충분한 기간임을 알 수 있다. 따라서 염수 환경의 노출 기간 증가가 시편에 미치는 영향을 확인하기 위해 15일씩 증가시키며 염수 분무 시험을 수행하였다. 즉, 염수 환경에 노출되지 않은 시편과 염수 환경에 15일, 30일의 기간 동안 노출된 시편을 비교하여 염수 영향을 관찰하였다. 염수 분무 시험을 거친 시편은 **Type NO.(1, 2)-염수 환경 노출 기간(0, 15, 30 Days)-Specimen NO.(1~3)**로 표기하였다.

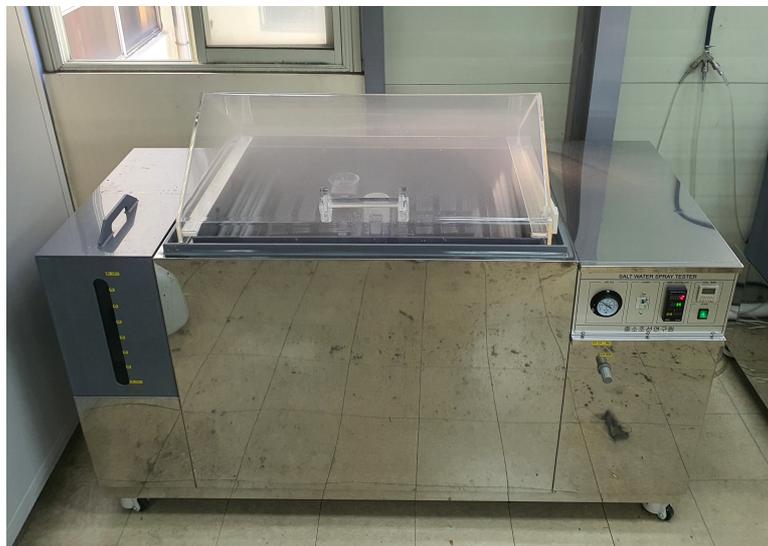


Figure 2.5 Test machine: Salt-water spray tester

Table 2.3 Summary of water absorption critical period [10, 18-24]

Concentration of solution	Conditioned temperature (°C)	Material	Critical period (Days)	Ref.
Water	25, 60	GF/pCBT composite	25	[18]
Seawater	60	GFRP composite	10	[19]
Artificial seawater (6 wt.% salt)	25	BFRP, GFRP composite	30	[10]
3.5% NaCl	35	Vinylester-based composite	12.5	[20]
5% NaCl	1, 10	CF/PEEK composite	25	[21]
	35	Flax-Basalt FRP composite	25	[22]
	35	Flax-Basalt FRP composite	25	[23]
	35	CF/Vinylester composite	17	[24]

2.2.2 시험 결과

염수 환경에 노출된 3D 프린트 복합재료 시편의 염수 흡수율은 ASTM D570 standard[25]에 따라 계산하였다. 염수 흡수율(W%)은 다음 식(2.1)을 통해 계산되었다.

$$W(\%) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad \text{식(2.1)}$$

여기서 W_t 는 t 기간 동안 염수 환경에 노출된 시편의 무게이며, W_0 는 염수 환경에 노출되지 않은 시편의 무게이다.

식(2.1)에 따라 0일(dry) 시편을 기준으로 15일 염수 노출 시편과 30일 염수 노출 시편의 염수 흡수율을 계산하여 Table 2.4에 정리하였다. 이를 통해 염수 환경 노출 기간에 따른 각 시편의 평균 염수 흡수율을 확인할 수 있다. 염수 환경에 노출된 동일 type의 시편에 대해서 염수 흡수율을 확인하였을 때, 염수 환경에 노출된 시편은 type과 상관없이 노출 기간이 증가할수록 무게가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Figure 2.6 (a), (b)와 같이 3D 프린팅 시 발생한 void와 type 2의 후가공 시 발생한 균열 사이로 염수가 분자 상태로 침투하기 때문이다[22, 26]. 또한 Figure 2.6 (c), (d)와 같이 염수에 의해 섬유 간 접촉 강도의 저하로 인해 발생한 층간 분리

구역에 염수가 침투했기 때문이다[10-11]. 염수 노출 기간이 길어질수록 분자가 침투하며 발생시킨 공간으로 점차 많은 염수가 침투하게 된다[10-11, 22, 26]. 하지만 염수를 흡수한 시편은 노출 기간이 길어질수록 포화상태에 가까워지므로 염수 흡수율은 일정 임계값에 도달하게 되어 염수 흡수율은 더 이상 증가하지 않게 된다.

Table 2.4 Result of salt-water absorption rate

Type	Exposure period (days)	Weight (g)		Weight variation (g)	Salt-water absorption rate (%)
		Before	After		
Type 1 (With wall layer)	0	8.87	8.87	0	0
	15	8.88	9.10	0.22	2.52
	30	8.89	9.15	0.25	2.85
Type 2 (Without wall layer)	0	9.00	9.00	0	0
	15	9.00	9.23	0.23	2.56
	30	9.04	9.33	0.29	3.17

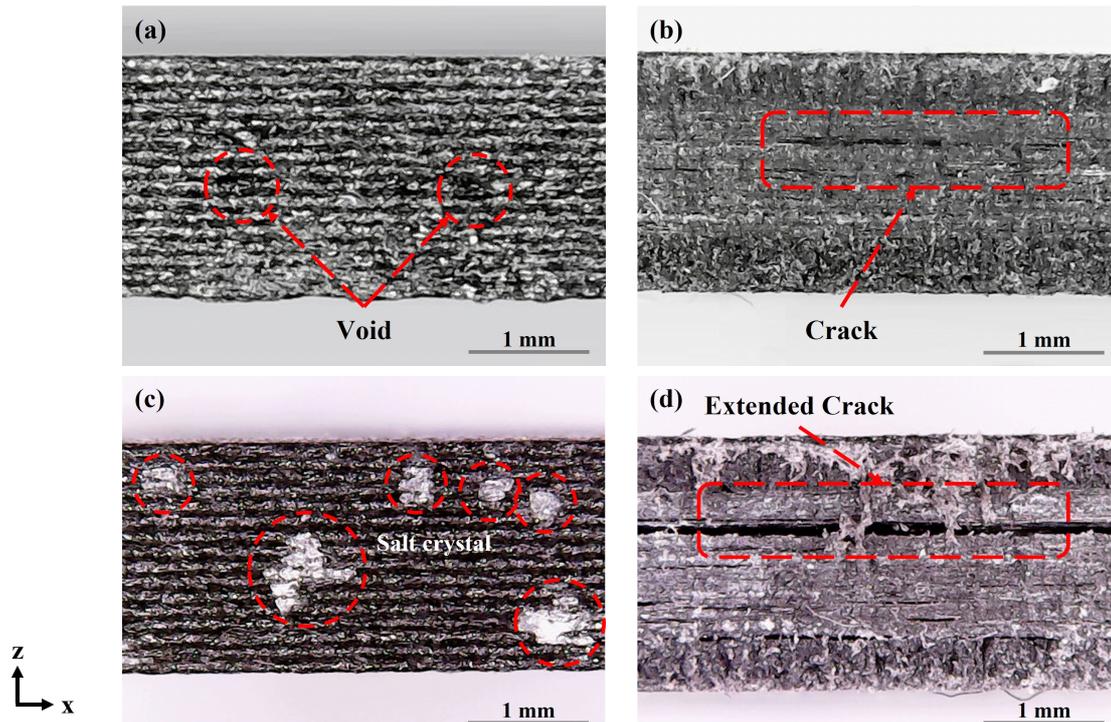


Figure 2.6 Microscopic image of specimen's side:
 (a) Type 1 and (b) Type 2 before salt-fog test,
 (c) Type 1 and (d) Type 2 after 30 days salt-fog test

Figure 2.7을 통해 염수 환경에 노출된 시편의 기간별 염수 흡수율과 Type 별

염수 흡수율을 확인할 수 있다. 15일 기간 동안 염수에 노출된 시편을 비교하였을 때, Type 1과 type 2의 염수 흡수율은 각 2.52%, 2.56%로 그 차이가 미미함을 알 수 있다. 하지만 30일의 기간 동안 염수에 노출된 시편의 경우, Type 1과 type 2의 염수 흡수율은 2.85%, 3.17%로 약 0.3%의 차이가 발생하였다. 이 차이는 15일 염수 노출 시편의 염수 흡수율 차이와 비교하였을 때 8배 높은 차이이다. Type 1 시편의 wall layer 층 사이로 염수가 침투하지만, wall layer가 시편으로의 추가적인 염수 침투를 방지하고 있기 때문에 type 1 시편의 염수 흡수율의 증가는 비교적 작다. 이에 반하여 시편 내부로의 염수 침투를 방지할 수 있는 wall layer의 부재로 type 2의 경우 후가공 시 발생한 층 사이의 균열과 void로 염수가 더욱 활발히 침투한다.

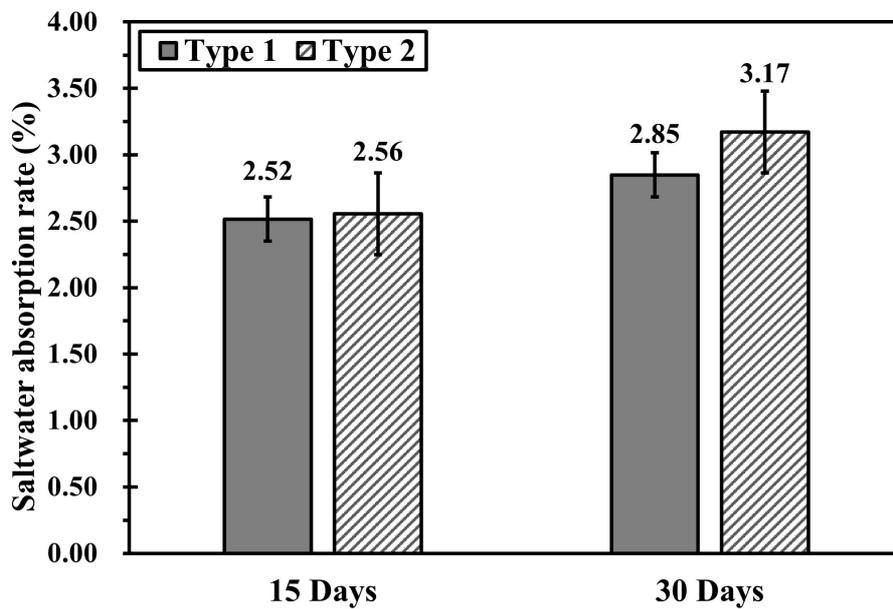


Figure 2.7 Comparison of salt-water absorption rate

2.3 인장 시험

2.3.1 인장 시험 장치 및 조건

염수 환경에 노출된 연속섬유 3D 프린트 복합재료 시편의 인장 강도를 평가하기 위해 ASTM D3039 standard[16]에 따라 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험은 Figure 2.8과 같이 DAEKYUNG TECH 사의 UTM(Universal Testing Machine)인 DTU-900MH 장비를 사용하여 수행하였으며, 장비의 Load cell capacity는 3kN이다. 인장 속도는 2mm/min으로 수행하였으며, 시험은 시편의 파단이 발생할 때까지 수행하였다. 인장시험에 사용된 시편은 염수 분무 시험을 통해 염수 환경에 노출된 시편(15일, 30일)과 노출되지 않은 시편(0일)을 사용하였으며, 인장 시험을 위한 실험실의 온도는 24~26 °C를 유지하였다. 인장 시험은 염수 환경 노출 기간에 따라 총 3가지 그룹(0일, 15일, 30일)으로 나누어 각 3개씩 진행하였다.



Figure 2.8 Test machine: Universal Testing Machine

2.3.2 시험 결과

Figure 2.9-2.10은 시편이 염수 환경에 노출되었을 때의 응력-변형률 거동을 보인다. Figure 2.9는 각 type의 시편이 서로 다른 염수 노출 기간에 노출되었을 때의 인장 거동을 보여준다. Figure 2.9에서 볼 수 있듯이 두 type 시편 모두 파단까지 선형적 거동의 동일한 경향을 가지며 시편의 최대 인장 강도에서 파단이 일어남을 확인하였다. 또한 염수에 노출되지 않은 시편의 경우 인장 강도가 가장

크다는 것을 알 수 있으며 염수 환경에 노출된 기간의 증가에 따라 인장 강도가 감소함을 확인할 수 있다. 이는 염수 환경이 시편의 인장 강도에 영향을 준다는 것을 의미한다.

Figure 2.10을 통해 염수 환경에 동일 기간 동안 노출된 시편이 wall layer의 유무에 따른 실험 결과를 비교할 수 있다. Figure 2.10 (a)를 통해 염수 환경에 노출되지 않은 시편의 실험 결과를 확인하였을 때, type 1과 type 2 시편의 인장 강도는 각 447.48MPa, 530.77MPa이다. Figure 2.10 (b)를 통해 염수 환경에 15일의 기간 동안 노출된 시편을 확인했을 때, type 1의 인장 강도는 444.01MPa이며, type 2 시편의 인장 강도는 485.29MPa이다. 염수 환경에 노출되지 않은 시편과 15일 동안 염수 환경에 노출된 시편의 경우, type 2 시편의 인장 강도가 type 1의 인장 강도의 각 119%, 109%의 인장 강도를 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 두 type 사이의 서로 다른 FVF(Fiber Volume Fraction)으로 인한 결과로 판단할 수 있다. FVF이 높은 경우 하중을 지탱할 수 있는 섬유가 차지하는 비율이 높다는 것을 의미한다. 따라서 FVF이 높은 경우 인장 강도가 더 큰 값을 갖는다. 본 연구의 인장 시편인 각 type 시편에서 섬유인 carbon fiber filament가 차지하는 비율을 확인했을 때, type 1 시편의 경우 약 47%이며, type 2 시편의 경우 50%로 서로 다르다. 그렇기 때문에 FVF가 더 높은 type 2 시편의 인장 강도가 더 높다는 것을 확인하였다. 반면, Figure 2.10 (c)를 통해 30일 기간 동안 염수 환경에 노출된 시편을 확인했을 때, type 1의 경우 408.34MPa의 인장 강도를 가지고 type 2 시편의 경우 386.33MPa의 인장 강도를 가지는 것을 확인하였다. 0일과 15일의 염수 시험 결과와는 다르게 30일 동안 염수에 노출됐을 때, type 2 시편의 인장 강도가 type 1의 인장 강도보다 94.6%의 인장 강도를 가진다. 즉, 이것은 type 2 시편의 경우 염수 환경의 영향으로 인한 기계적 성능 감소가 더 크다는 것을 의미한다.

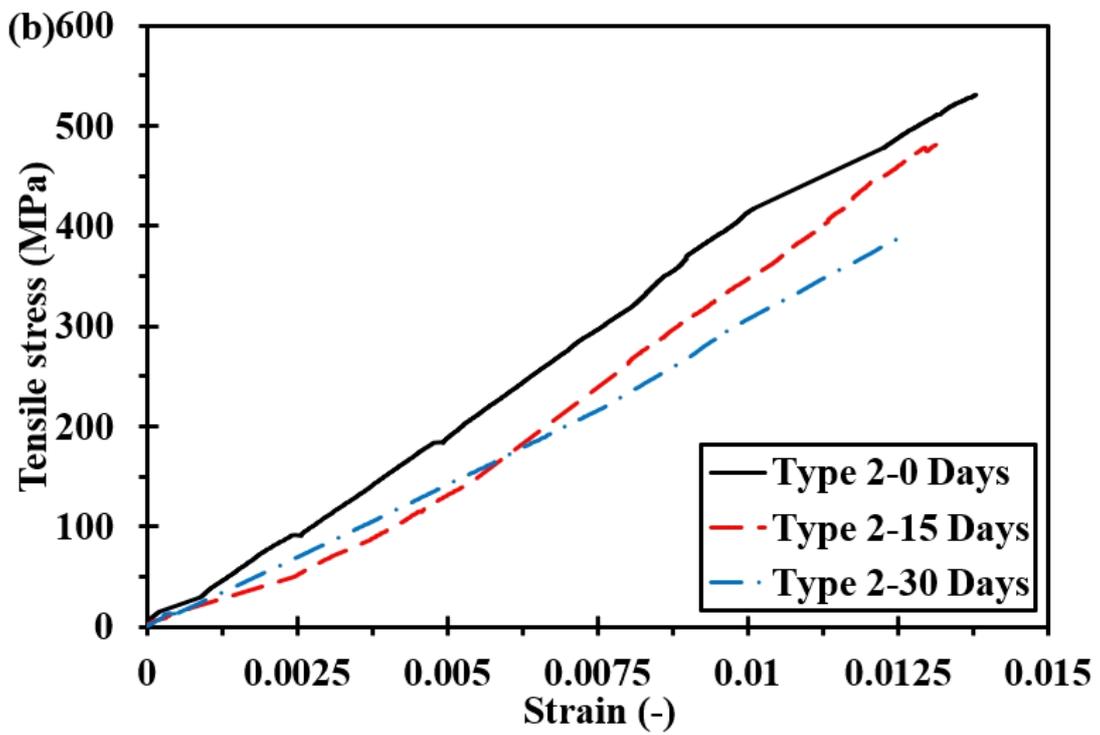
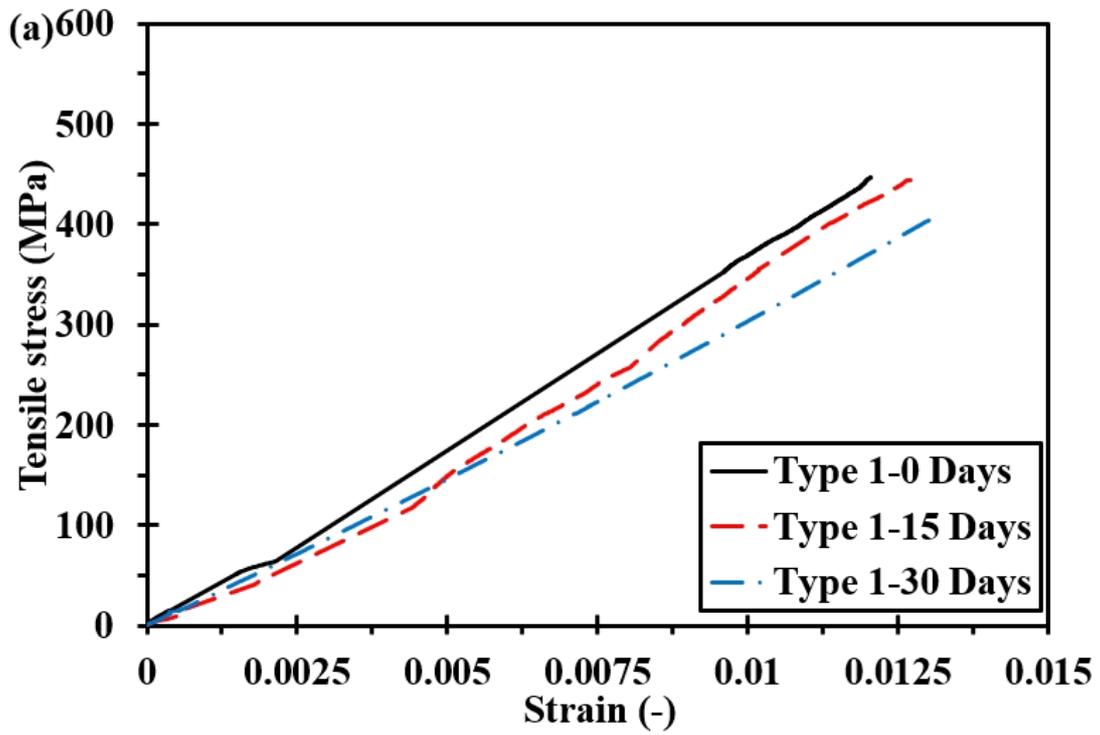


Figure 2.9 Comparison of stress-strain curve by exposure time
 (a) Type 1, (b) Type 2

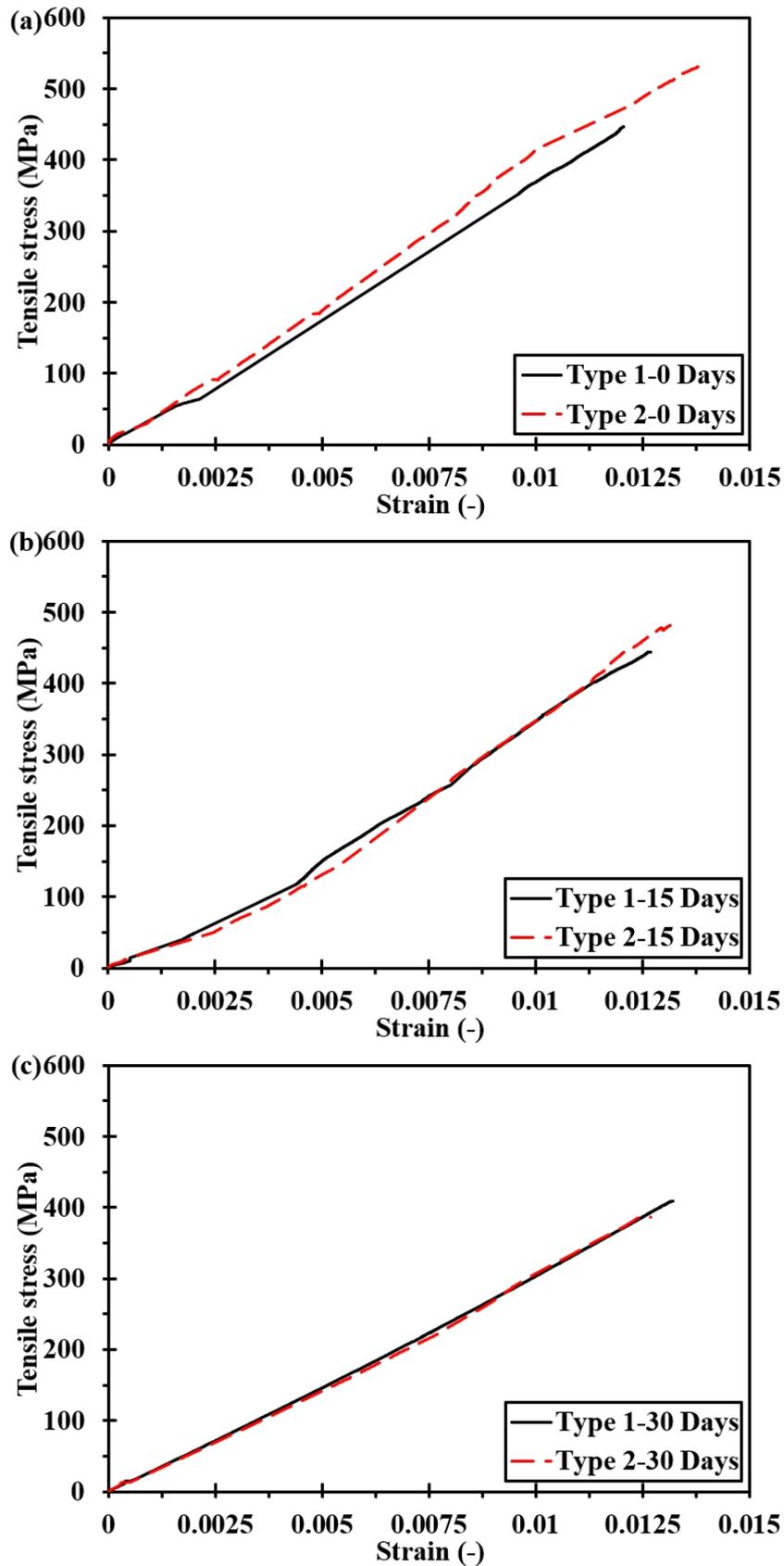


Figure 2.10 Comparison of stress-strain curve by type
(a) 0 Days, (b) 15 Days, (c) 30 Days

Figure 2.11은 염수 환경에 동일 기간 동안 노출된 시편의 기계적 성능 변화를 나타낸다. 15일, 30일 동안 염수 환경에 노출된 시편의 경우 wall layer의 유무에 상관없이 기계적 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 특히, wall layer가 없는 type 2 시편의 인장 강도와 인장 계수 저하가 wall layer가 있는 type 1 시편에 비해 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 염수 환경에 노출되지 않은 두 시편의 인장 값과 15일 동안 염수 환경에 노출된 두 시편의 인장 강도 값의 차이를 확인했을 때, 15일 동안 염수 환경에 노출된 시편의 인장 강도 값의 차이가 작은 것을 알 수 있다. 30일 동안 염수 환경에 노출된 두 시편의 경우에는 15일의 염수 시험 결과와는 다르게 type 1 시편의 인장 강도가 type 2 시편보다 더 큰 것을 Figure 2.10.과 함께 확인할 수 있다. 이러한 동일한 염수 환경 노출 기간에서 기계적 성능 저하 폭의 차이를 보이는 원인으로써 wall layer의 존재 유무가 중요한 인자로서 판단될 수 있다. Figure 2.6에서 확인할 수 있듯이, 염수 환경에 노출된 시편의 층 사이 균열 및 Void로 염수가 침투하게 된다. 하지만 type 1 시편의 경우 wall layer가 시편으로 침투하는 염수를 방지하기 때문에 염수의 영향을 감소시킬 수 있다. 반면, type 2 시편의 경우 onyx 층과 carbon 층 사이로의 염수 침투를 방지할 수 있는 wall layer가 없기 때문에 더 큰 염수의 영향을 받는 것으로 판단된다.

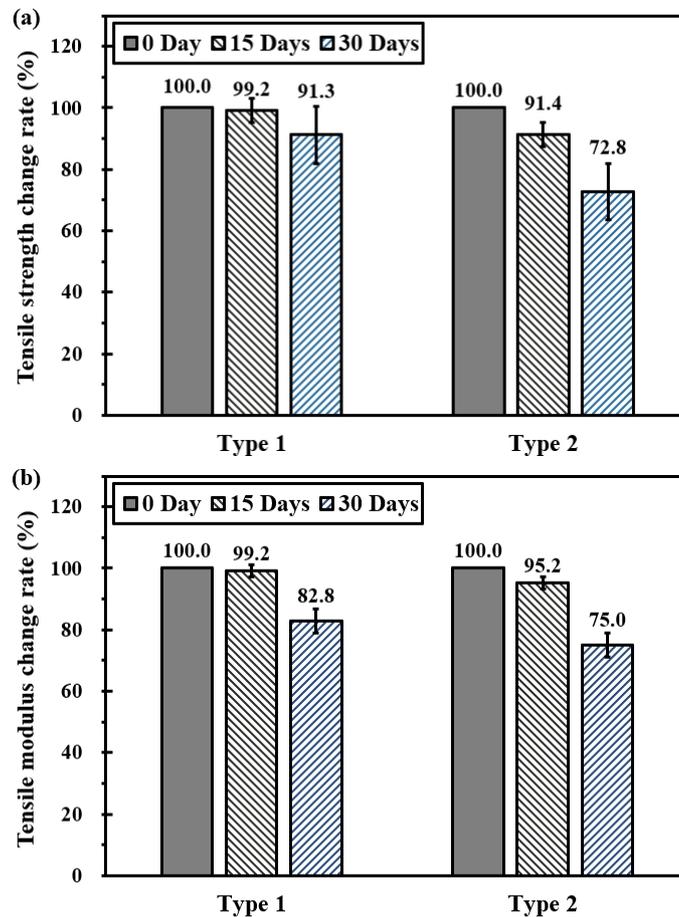


Figure 2.11 Comparison of tensile properties change rate
(a) Strength, (b) Modulus

2.4 염수 분무 시험에 따른 인장 시험 결과 비교

2.4.1 염수 흡수율과 인장 강도의 관계

염수 분무 시험을 통해 얻은 염수 흡수율과 인장 시험을 통해 얻은 인장 특성에 대한 결과 값을 Table 2.5에 요약하였다. Table 2.5에 보이는 바와 같이, 두 종류 시편의 경우 모두 염수 환경 노출 기간의 증가에 따라 염수 흡수율의 증가를 확인할 수 있다. 또한 염수 노출 기간이 증가함에 따라 인장 계수와 인장 강도는 감소함을 확인할 수 있다. 시험 결과의 COV를 확인해 보면 type 1 시편에 비해 type 2 시편의 COV가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 후가공 과정에서 시편에 손상이 발생했기 때문이다. Type 2 시편 중 30일 염수 분무시험을 수행한 시편의 경우 COV 값이 감소하였다. 이는 시편 가공 과정의 손상보다 염수 노출에 의한 손상이 시험 결과에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이다. Figure 2.12는 인장 강도와 염수 흡수율의 관계를 보여준다. 염수 흡수율과 인장 강도 감소율을 확인했을 때 두 시편은 서로 다른 경향을 보여준다. Type 1 시편의 경우 염수 흡수율의 증가 폭이 비교적 작으며 염수 환경 노출 기간의 증가에도 인장 강도의 감소율이 미미하다. 하지만 type 2 시편의 경우 염수 흡수율이 비교적 높으며 염수 환경 노출 기간의 증가에 따른 인장 강도 감소가 눈에 띄게 크다. 이를 통해 염수 환경에 노출된 시편의 경우 인장 강도 및 인장 계수가 감소함을 알 수 있다. 하지만 Wall layer의 유무에 따라 시편의 인장 강도 및 계수의 감소 폭에 차이가 있는 것을 알 수 있다.

Table 2.5 Experimental result

Type	Exposure period (Days)	Salt-water absorption rate (%)	Tensile modulus (GPa)	COV (%)	Tensile strength (MPa)	COV (%)
Type 1	0	0	37.05	1.48	447.48	1.42
	15	2.52	36.76	1.40	444.01	1.03
	30	2.85	30.69	1.05	408.34	1.87
Type 2	0	0	39.94	6.68	530.77	8.26
	15	2.56	38.02	8.66	485.29	5.25
	30	3.17	29.96	3.88	386.33	4.11

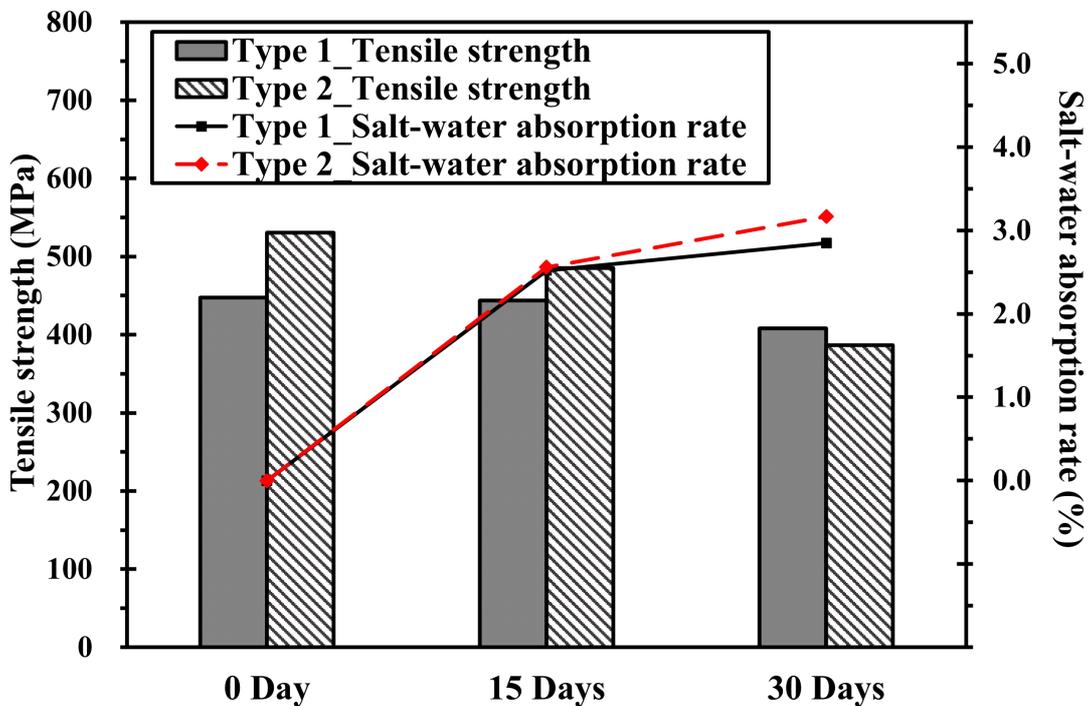


Figure 2.12 Relationship between salt-water absorption rate and tensile strength

염수 환경은 복합재료 시편에 다음과 같이 다양한 영향을 미칠 수 있다[10-11, 22, 26-27]. 매트릭스의 가소화, 섬유와 매트릭스의 화학적/물리적 성능 악화, 팽창 및 내부응력 발생, 수분 및 분자 침투로 인한 Void 및 균열 확대, 섬유와 매트릭스 사이의 접착 강도 저하로 인한 debonding 현상 등으로 인해 기계적 성능이 감소한다.

염수에서 NaCl은 양이온(Na^+)과 음이온(Cl^-) 상태로 존재하며 이는 물 분자(H_2O)와 함께 복합재료 시편에 침투하여 매트릭스, 섬유와 섬유/매트릭스 계면을 손상시킨다[22, 26]. 즉, 염수 환경에 노출된 시편의 경우 염수가 Figure 2.6 (a), (b)에 보이는 것과 같이 시편의 제작 및 후가공으로 인해 발생한 void와 crack으로 침투하게 된다. 이처럼 시편에 침투한 염수는 시편의 기계적 특성에 악영향을 끼치고[26-27] 노출 기간이 증가함에 따라 시편의 물리적/화학적 열화현상을 발생시킨다[10, 26]. 또한 침투한 염수는 시편의 내부에 정착하여 내부에서의 응력을 발생시킨다[10]. 내부에서 발생하게 된 응력은 수분이 침투한 void 및 crack을 Figure 2.6 (c), (d)에서 보이는 것과 같이 확장시켜 섬유와 매트릭스 계면의 접착 강도를 저하시키며[11], 이는 섬유/매트릭스 계면의 debonding 현상을 발생시킨다. Figure 2.13에서 보이는 바와 같이 시편으로 염수가 침투하여 void 및 crack을 확장시키는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 확장된 void 및 crack은 염수가 추가적으로 침투할 수 있는 공간을 마련한다. 이에 따라 염수 환경 노출 기간이 증가함에 따라 염수 흡수율은 증가하게 된다. 또한 void 및 crack의 크기가 확장되면 섬유, 매트릭스와 섬유/매트릭스 사이의 접착 강도가 저하되게 된다. 접착 강도가 저하됨으로 시편에 delamination이 발생하게 되어 인장 강도 저하가 발생한다. Type 1 시편의 경우 시편 side를 통해 내부로 염수가 침투하는 것을

방지할 수 있는 wall layer가 존재하기 때문에 염수 침투가 원활하지 않아 인장 특성 감소 폭이 크지 않다. 반면 type 2 시편의 경우 wall layer의 부재로 염수의 침투가 비교적 원활하다. 따라서 인장 특성 감소 폭이 비교적 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 wall layer의 유무에 따라 달라지는 염수 흡수량은 시편의 기계적 특성 저하에 큰 영향을 끼치는 원인임을 알 수 있다.

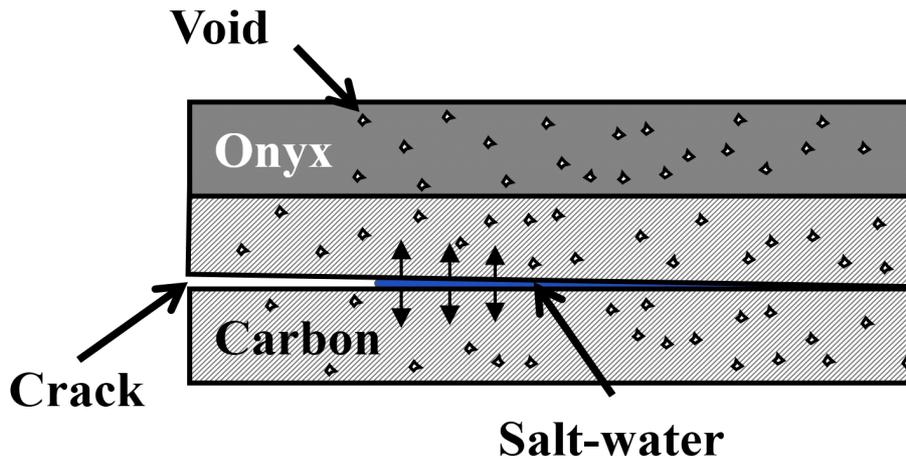


Figure 2.13 Schematic of expansion of crack and void

2.4.2 파손 형상

염수 환경이 시편에 미치는 영향을 확인하기 위해 3D 프린트 복합재료 시편의 파손 형상을 분석하였다. 염수 환경에 노출된 시편의 경우 파손 형상의 변화가 발생할 수 있다. Table 2.6은 ASTM D3039 standard[16]에서 규정한 복합재료 시편의 인장 시험 시 발생할 수 있는 다양한 파손 형상의 코드이다. 인장 파손 형상은 3개의 글자로 이루어져 있다. 첫 글자는 파손 유형을 의미하고 두 번째 글자는 파손 범위를 의미한다. 마지막 글자는 파손 위치를 의미하는데 이 중 시편의 파손 유형인 첫 글자가 가장 중요한 글자이다. 첫 글자는 시편이 어떠한 유형의 손상을 가지고 있는지를 나타내는데 이는 기계적 성능과 연관이 있다. 먼저 L(Lateral) 파손 유형은 인장 하중이 작용함에 따라 섬유가 인장 하중을 충분히 지탱하지 못하고 끊어지며 발생한다[28]. A(Angled) 파손 유형은 시편에 인장 하중이 가해졌을 때 전단 응력에 의해 각도를 가지며 파단이 발생하는 유형이다[29]. D(edge Delamination) 파손 유형은 인장 하중에 의해 발생한 crack이 커지며 층 사이 변위 차를 유발하게 되는데, 이때 변위 차에 의해 debonding이 일어나 최종 파단으로 이어지는 파손 유형이다[30-32]. G(Grip/tab) 파손 유형의 경우 시편과 탭을 부착하기 위해 사용한 접착제가 인장 하중을 버티지 못하고 slip과 같은 현상이 발생하는 유형이다[16]. X(eXplosive) 파손 유형은 섬유, matrix, 섬유/matrix 계면의 debonding 현상과 섬유의 파손이 단계적으로 일어나며 발생하는 파단 유형이다[28].

Table 2.6 Tensile test failure code [16]

First character		Second character		Third character	
Failure type	Code	Failure area	Code	Failure location	Code
Angled	A	Inside grip/tab	I	Bottom	B
edge Delamination	D	At grip/tab	A	Top	T
Grip/tab	G	Gage	G	Left	L
Lateral	L	Multiple areas	M	Right	R
Multi-mode	M	Various	V	Middle	M
long. Splitting	S	Unknown	U	Various	V
eXplosive	X			Unknown	U
Other	O				

Figure 2.14는 염수 분무 시험 후 인장 시험을 수행한 시편의 결과 사진이다. 인장 시험을 수행한 시편의 결과를 분석하여 파손 형상을 확인하는 과정을 통해 시편에 염수가 미친 영향을 분석할 수 있었다. 우선 type 1 시편의 경우 염수 환경 노출 기간과 상관없이 주요 파손 유형이 L, A임을 알 수 있다. 해당 파손은 앞서 언급한 것과 같이 인장 하중이 작용함에 따라 섬유가 인장 하중을 지탱하지 못하고 끊어지며 발생하거나 인장 하중이 가해질 때 전단 응력에 의해 각도를 가지며 파단이 발생하는 유형이다. Type 1 시편의 경우 염수 환경 노출 기간이 다르지만, 동일한 파손 유형을 가짐을 확인할 수 있다. 이를 Figure 2.11과 함께 확인해 보면 15일, 30일 동안 염수 환경에 노출된 type 1 시편의 인장 강도는 염수 환경에 노출되지 않은 시편의 인장 강도의 99.2%(0.8%↓), 91.3%(8.7%↓)의 값을 가진다. 해당 인장 강도 감소율의 경우 type 2 시편과 비교하였을 때 미미한 값을 알 수 있다. 이는 wall layer가 시편으로 침투하는 염수를 방지했기 때문에 염수의 영향을 크게 받지 않았음을 의미한다.

Type 2 시편의 경우 시편이 염수 환경에 노출됨에 따라 주요 파손 유형이 L에서 D로 변화함을 확인할 수 있다. Type 2 시편의 경우 Figure 2.6에서 확인할 수 있듯이 시편의 후가공 과정에서 crack이 발생하였다. 이때 시편이 염수 환경에 노출되는 경우 발생된 crack으로 염수가 침투하여 crack이 확장되며 인장 하중이 작용되었을 때 층 사이의 변위 차에 의해 debonding 현상이 발생한다. 따라서 주요 파손 유형이 D로 변화하게 되었다. 이를 Figure 2.11과 함께 확인해 보면 15일, 30일 동안 염수 환경에 노출된 type 2 시편의 인장 강도는 염수 환경에 노출되지 않은 시편의 인장 강도의 91.4%(8.6%↓), 72.8%(27.2%↓)의 값을 가진다. 이는 wall layer의 부재로 인해 시편으로 염수의 침투가 용이하기 때문이다. 염수의 침투는 void와 crack의 확장을 유발하며 섬유, matrix, 섬유/matrix의 접착을 약화시킨다. 이러한 염수 침투로 인한 영향으로 type 2 시편의 기계적 강도 저하가 type 1 시편의 기계적 강도 저하보다 더 큰 것을 확인하였다.

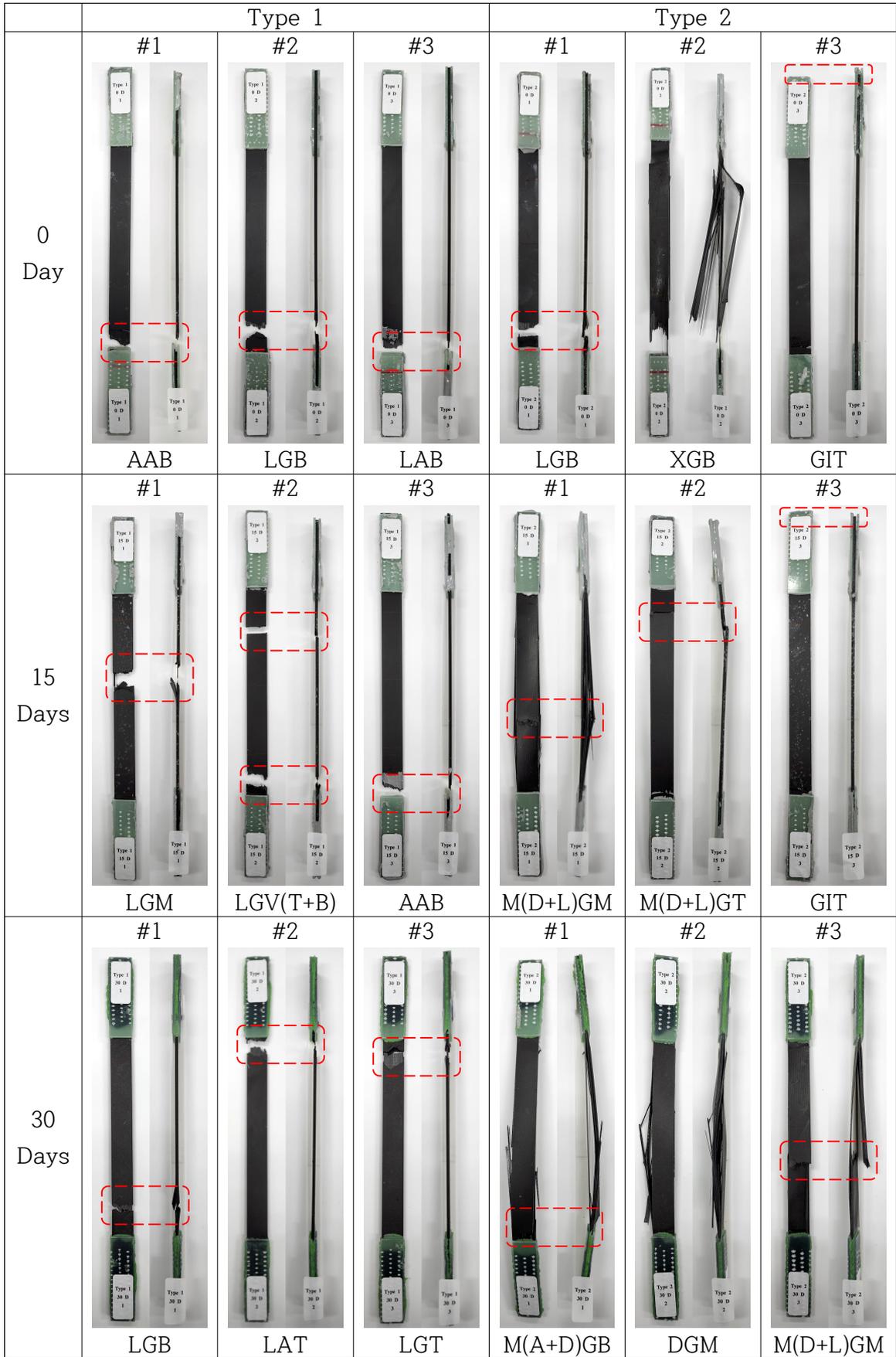


Figure 2.14 Tensile failure mode of 3D printed specimen

제 3장 선/후 가공을 통해 제작된 원공 노치를 갖는 3D 프린트 복합재료 시편의 핀(Pin) 체결 강도 평가

3.1 실험 시편 제작

3.1.1 시편 치수

3D 프린트 복합재료 시편의 핀(Pin) 체결 강도 평가를 위한 시편의 형상 및 치수는 Figure 3.1과 Table 3.1에 정리하였다. 시편의 전체 길이(L)는 120mm이며 원공 노치 직경(D)의 변화에 따른 기하학적 영향을 조사하기 위해 원공 노치의 직경을 5, 6, 8, 10mm로 구분하여 제작하였다. 원공 직경과 달리 시편의 폭(W)과 원공 중심부터 끝단까지의 거리(E)를 고정시켜 원공 직경에 대한 폭 비(W/D)와 원공 중심부터 끝단까지 거리 비(E/D)의 값에 변화를 주었다. 각 원공 직경에 따른 W/D와 E/D를 Table 3.1에 정리하였다.

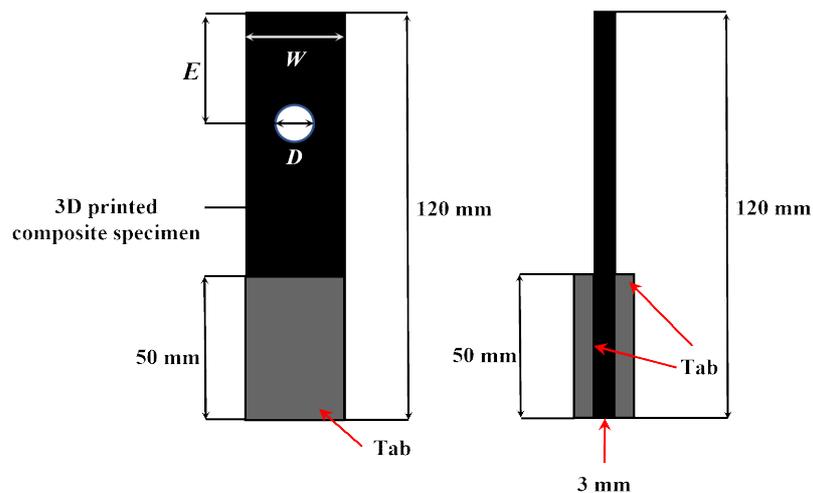


Figure 3.1 Schematic of 3D printed bearing specimen

Table 3.1 Summary of dimension and W/D, E/D

D (mm)	W (mm)	E (mm)	W/D	E/D
5	20	30	4.0	6.0
6	20	30	3.3	5.0
8	20	30	2.5	3.8
10	20	30	2.0	3.0

3.1.2 3D 프린트 복합재료 시편 제작

시편의 제작은 Markforged 사의 X7™ 3D 프린터를 사용하여 제작하였다. 시편 제작에 사용된 소재는 carbon fiber filament와 onyx filament이다. Carbon fiber filament와 onyx filament의 한 층의 두께는 0.125 mm이다. 시편의 위/아래 laminate는 onyx를 각 4층을 적층하여 각 0.5mm의 두께를 가지며, 중앙 laminate는 carbon fiber filament를 이용하여 16층을 적층하여 2mm의 두께를 갖는다. 따라서 시편의 전체 두께(t)는 3mm로 3D 프린팅 제조 방식 중 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식을 이용하여 총 24층 적층하였다. 이때 시편에 대한 기하학적 영향뿐만 아니라 프린팅 방향에 따른 기계적 체결 강도와 파손 형상을 분석하기 위해 Figure 3.2와 같이 시편의 중앙 laminate에 0°, ±45°, 90° 3가지 프린팅 방향을 선정하여 제작하였다. 제작된 시편의 적층 정보를 Table 3.2에 정리하였다.

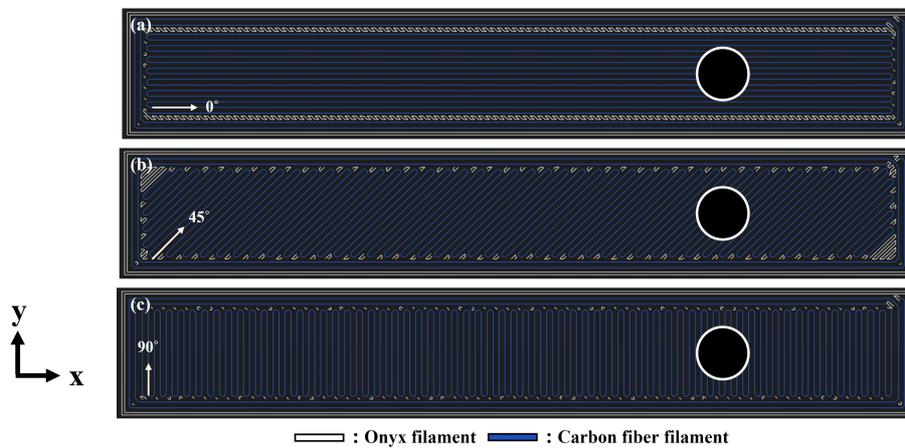


Figure 3.2 Markforged S/W Eiger image: Printing direction of Core laminate
(a) 0°, (b) ±45°, (c) 90°

Table 3.2 Laminate information of 3D printed bearing specimen

	Material	Printing direction	Total layer No.	Total layer thickness(mm)
(a)	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
	Carbon fiber	[0°] ₁₆	16	2.0
	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
(b)	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
	Carbon fiber	[±45°] ₈	16	2.0
	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
(c)	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
	Carbon fiber	[90°] ₁₆	16	2.0
	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5

3D 프린트의 경우 기존의 제작방식과 다르게 주형이 필요 없으며 원공과 같은 노치를 제작하기 위한 후가공 없이 구조물을 제작할 수 있다는 장점이 있다. 이에 원공을 제작하기 위해 3D 프린팅을 활용하는 방식과 후가공을 통해 제작하는 방식을 이용하여 두 가지 type의 시편을 제작하였다. Type 1 시편의 경우 3D 프린터를 통해 원공을 제작하였고, type 2 시편의 경우 제작하고자 하는 시편의 치수(L, W, t)와 동일한 직사각 판을 3D 프린팅한 후 후가공(CNC)을 이용하여 원공을 제작하였다. Type 2 시편의 경우 후가공으로 정확한 치수의 원공의 구현이 가능하지만, 후가공에 의해 발생하는 손상이 기계적 체결 강도에 영향을 줄 수 있다[13]. 따라서 원공 제작 방식에 따른 강도와 파손 형상을 분석하기 위해 두 가지 type의 시편을 이용하여 베어링 시험을 수행하였다.

3.2 실험 구성

3.2.1 이중 체결 픽스처(Double-lab fixture) 및 핀(Pin)

베어링 시험에서 사용된 이중 체결 픽스처와 핀은 스테인리스 스틸을 이용하여 제작되었으며 핀의 경우 50mm의 길이를 가지며 원공의 직경과 동일한 5, 6, 8, 10mm의 직경을 갖도록 제작하였다. 시험 진행 중 crack의 진전을 확인하기 위해 이중 체결 픽스처에 window를 제작하는 방식을 고안하였다. 고안한 이중 체결 픽스처는 Figure 3.3과 같다. 제작된 window를 통해 시험의 진행과 동시에 crack의 발생 여부와 진전 방향을 확인할 수 있다. Window 안에 있는 튀어나온 부분은 핀과 체결하기 위한 구조이며 핀의 직경과 동일하게 5, 6, 8, 10mm의 직경을 갖는 4가지의 픽스처를 제작하였다.

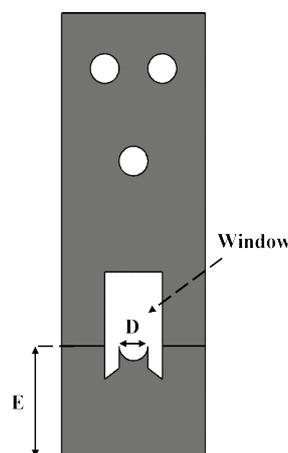


Figure 3.3 Schematic of double-lab fixture

3.2.2 인장 시험 장치 및 조건

베어링 시험은 Figure 2.8에 보이는 UTM(Universal Testing Machine, DAEKYUNG TECH 사)을 이용하였다. 시험은 ASTM D5961 standard[33]에 따라 수행하였다. 인장 속도는 2mm/min으로 수행하였으며, 시험 종료 조건은 최대 하중의 70%로 적용하였다. 시편은 Figure 3.4에 보이는 것과 같이 스테인리스 스틸로 제작된 핀을 이용하여 이중 체결 픽스처와 체결하였으며 체결된 시편을 시험 장비에 설치하여 시험을 수행하였다.

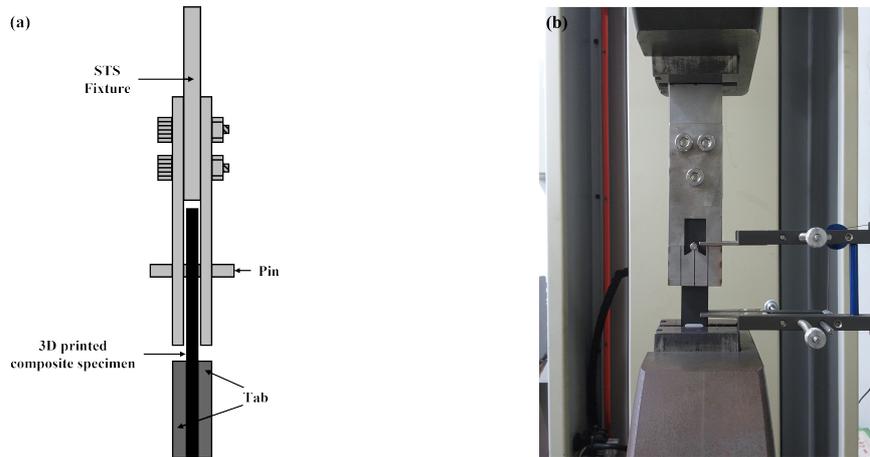


Figure 3.4 Experimental set-up:

(a) Schematic of the fastened specimen (b) Specimen installed in UTM

3.3 기계적 체결 강도 평가

3.3.1 기계적 체결 강도

Figure 3.5-3.12를 통해 선/후가공으로 구분된 3D 프린트 복합재료 시편의 프린팅 방향에 따른 기계적 체결 강도를 확인할 수 있다. Figure 3.5-3.8은 3D 프린터를 통해 원공을 제작한 type 1의 프린팅 방향에 따른 하중-변위 선도이다. 0° 방향으로 프린팅된 시편의 경우 다른 각도로 프린팅된 시편과 비교하였을 때 동일한 W/D에서 2.5%~69.6% 높은 하중에서 파단이 발생함을 확인할 수 있다. Figure 3.9-3.12는 3D 프린터로 사각 평판을 제작한 후 후가공을 통해 원공을 제작한 type 2의 프린팅 방향에 따른 하중-변위 선도이다. Type 2의 하중-변위 선도에서도 type 1과 동일하게 0° 방향으로 프린팅된 시편의 경우 다른 각도로 프린팅된 시편에 비하여 2.7%~35.5% 높은 하중에서 파단이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 하중 방향으로의 섬유 배치가 더 높은 하중을 견딜 수 있기 때문이다.

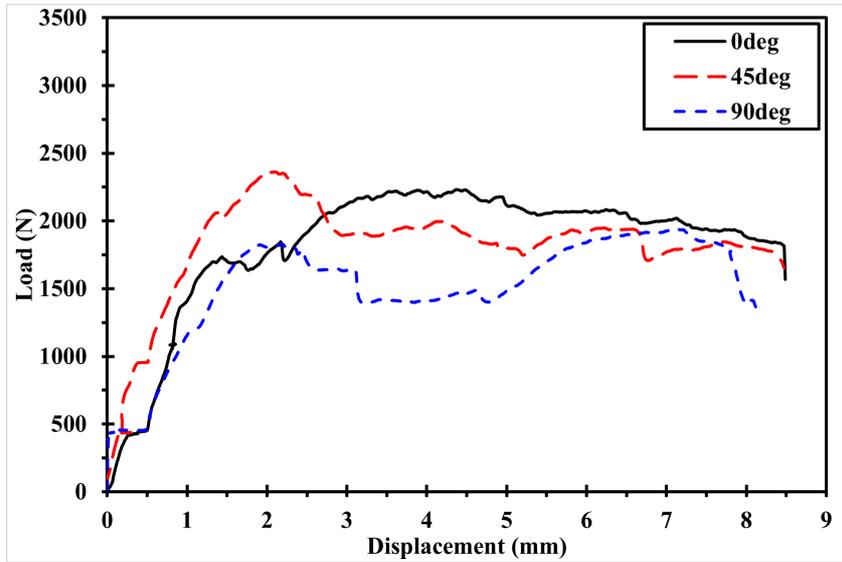


Figure 3.5 Load-Displacement curve of Type 1-D5 specimen

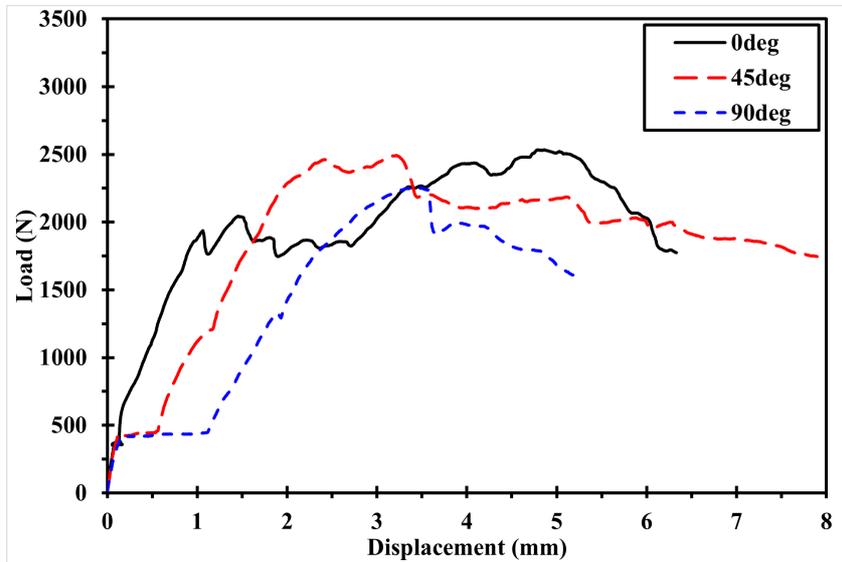


Figure 3.6 Load-Displacement curve of Type 1-D6 specimen

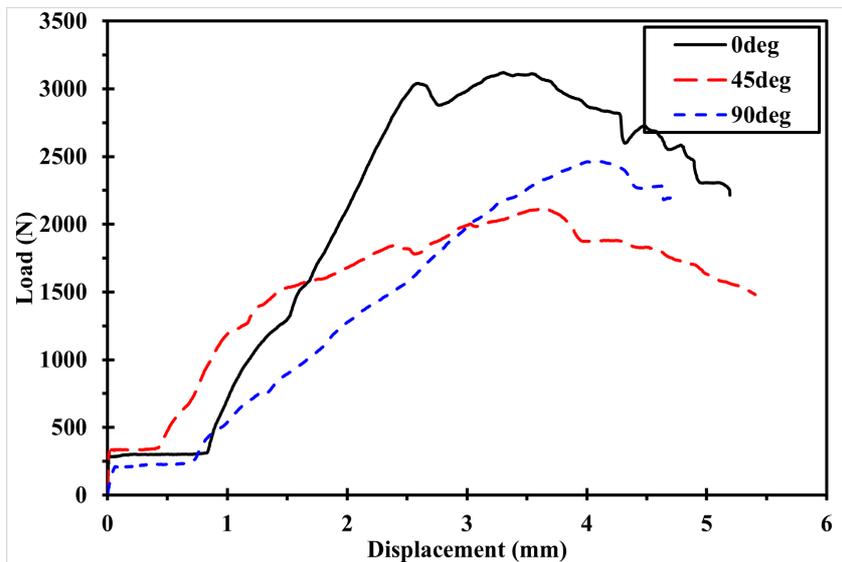


Figure 3.7 Load-Displacement curve of Type 1-D8 specimen

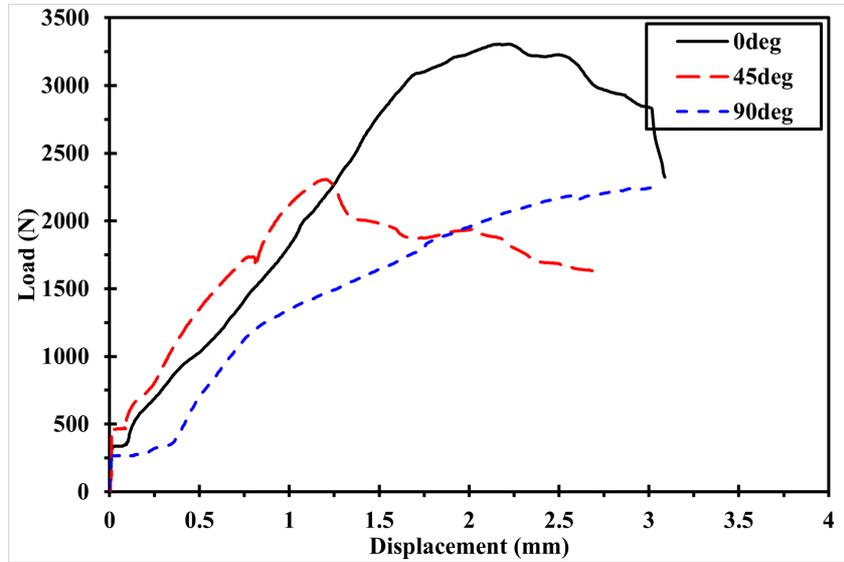


Figure 3.8 Load-Displacement curve of Type 1-D10 specimen

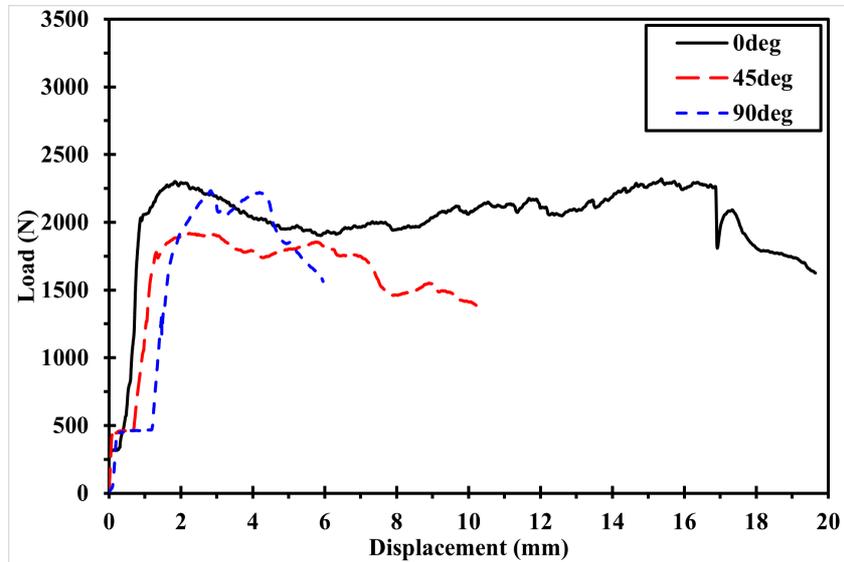


Figure 3.9 Load-Displacement curve of Type 2-D5 specimen

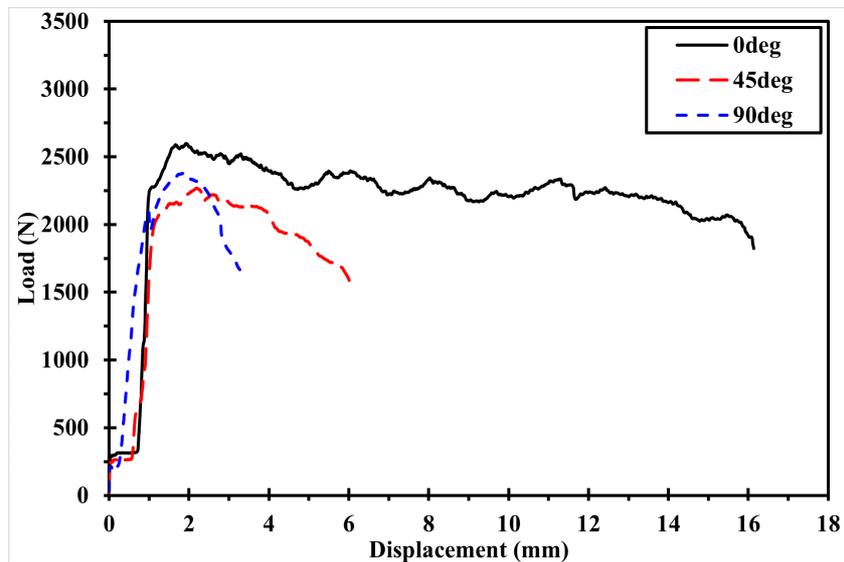


Figure 3.10 Load-Displacement curve of Type 2-D6 specimen

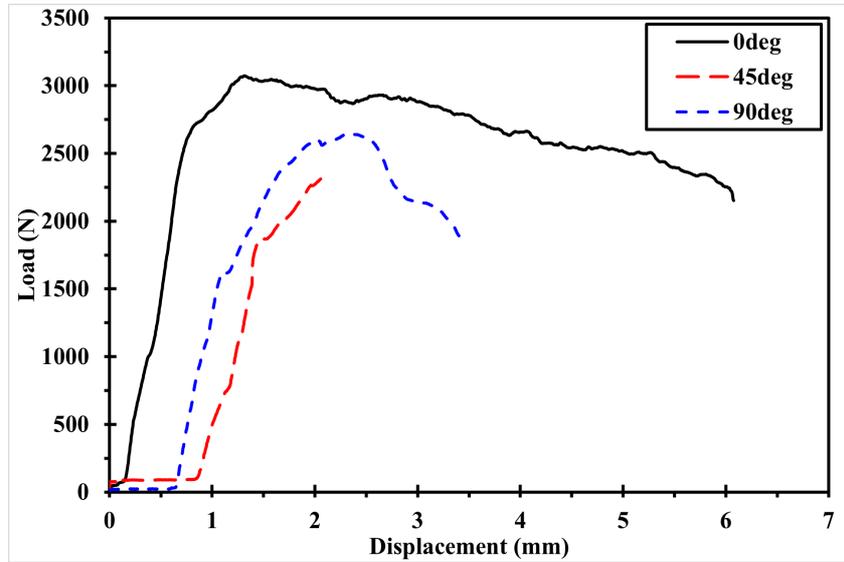


Figure 3.11 Load-Displacement curve of Type 2-D8 specimen

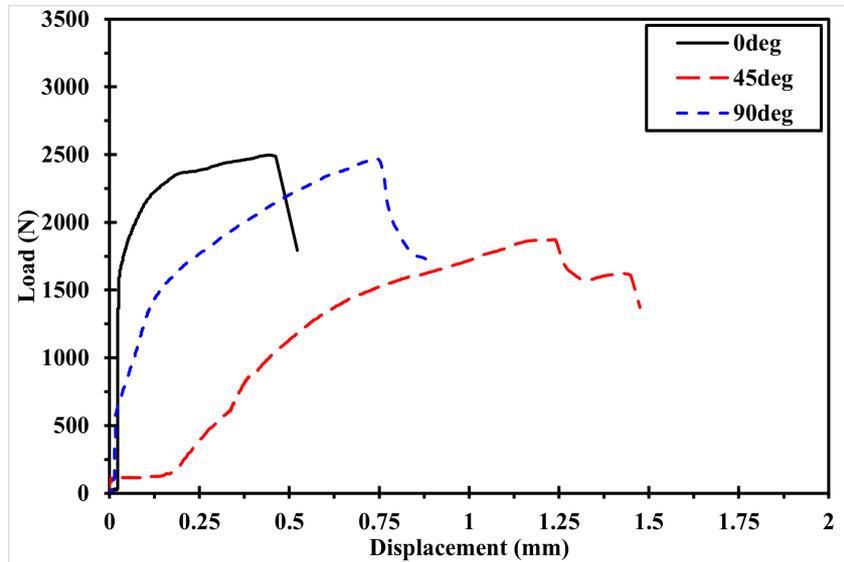


Figure 3.12 Load-Displacement curve of Type 2-D10 specimen

Figure 3.13-3.18을 통해 동일 프린팅 방향을 가진 3D 프린트 복합재료 시편의 원공 직경 증가에 따른 기계적 체결 강도를 확인할 수 있다. 하중-변위 선도를 확인하였을 때, 동일한 원공 제작방식과 동일한 프린팅 방향을 가진 대부분 시편에 대하여 원공 직경이 증가함에 따라 최대 지압 하중이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 원공 직경의 증가에 따라 핀과 시편의 접촉 면적이 증가하여 단위면적 당 작용하는 하중의 크기가 감소했기 때문이다. 단위면적 당 작용하는 하중의 크기가 감소함으로써 응력 집중 현상이 줄어들기 때문에 더 큰 하중을 견딜 수 있다. 하지만 Figure 3.14를 확인하였을 때 원공 직경이 6mm에서 8mm로 증가할 때 최대 지압 하중이 감소함을 확인할 수 있다. 또한 Figure 3.15-3.18에서는 원공 직경이 8mm에서 10mm로 증가할 때 최대 지압 하중이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 파손 형상의 변화에 의해 발생하는 현상으로 판단된다. 시편의 파손 형상에 대해서는 3.3.2에서 다룰 예정이다.

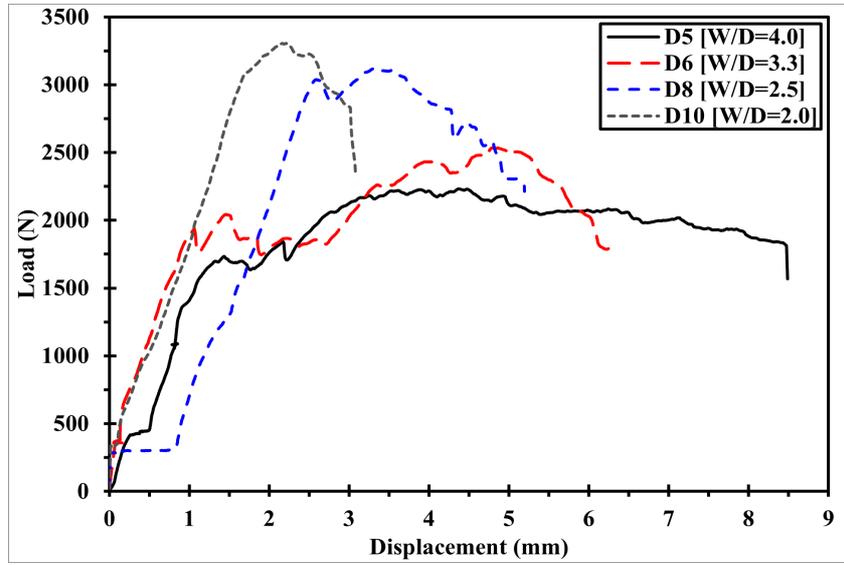


Figure 3.13 Load-Displacement curve of Type 1-0° specimen

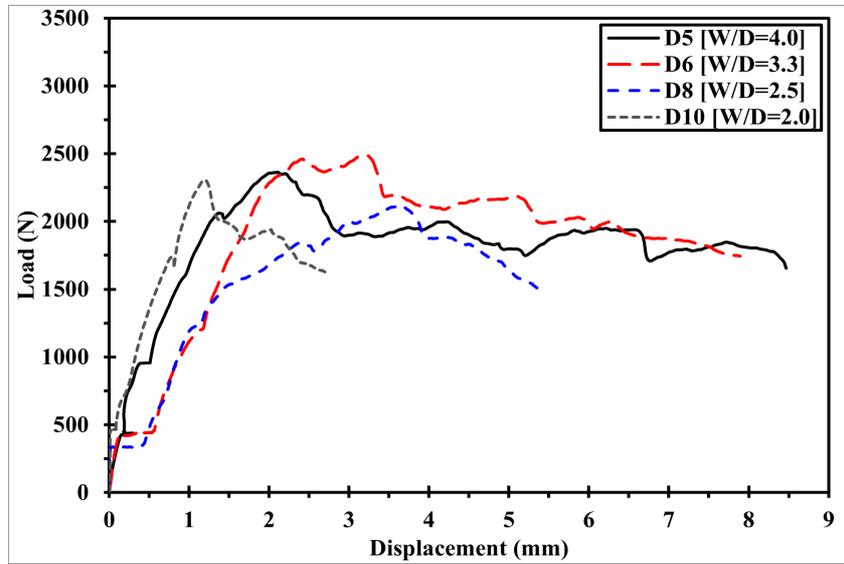


Figure 3.14 Load-Displacement curve of Type 1-±45° specimen

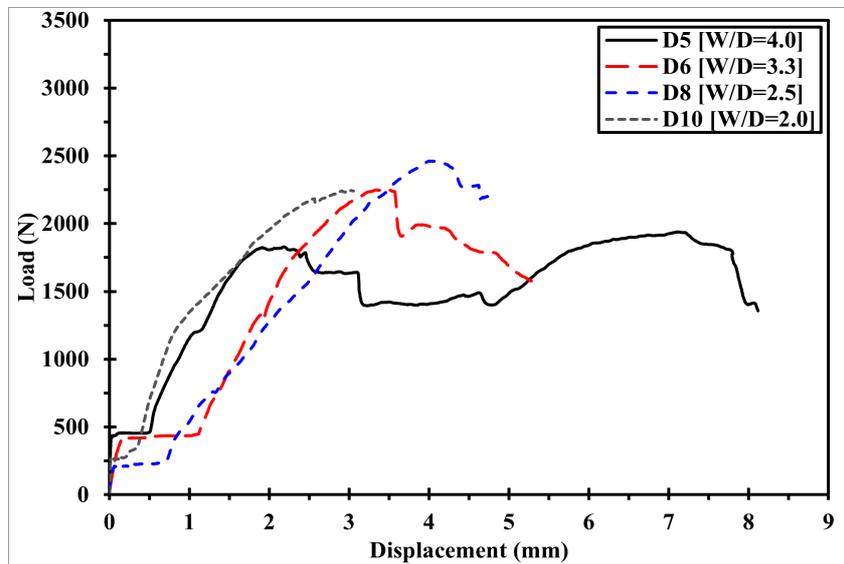


Figure 3.15 Load-Displacement curve of Type 1-90° specimen

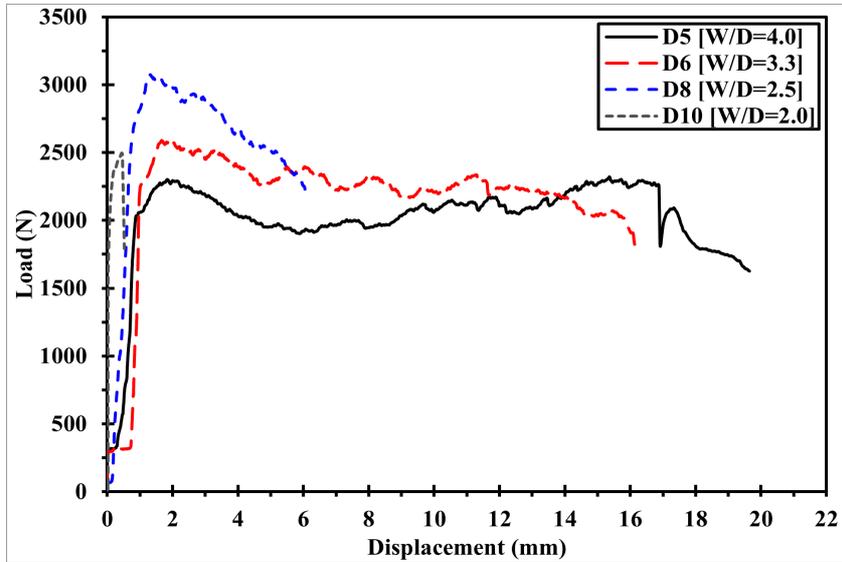


Figure 3.16 Load-Displacement curve of Type 2-0° specimen

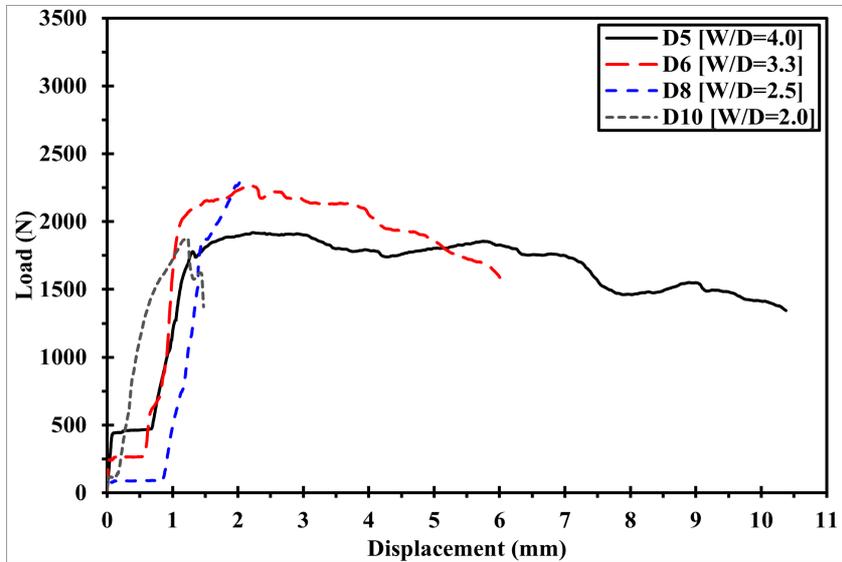


Figure 3.17 Load-Displacement curve of Type 2-±45° specimen

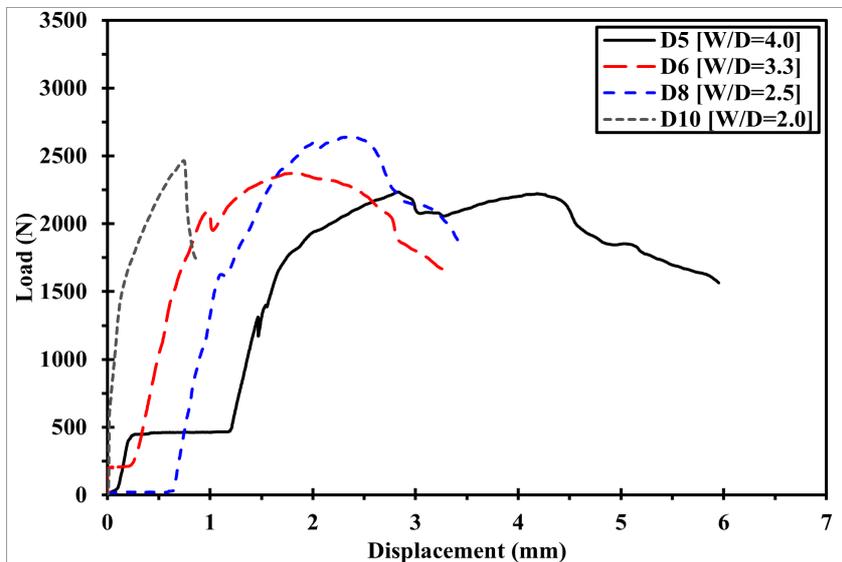


Figure 3.18 Load-Displacement curve of Type 2-90° specimen

3.3.2 파손 형상

복합재료를 기계적 체결 방식으로 연결하는 경우 다양한 파손 형상이 발생된다. 이때 파손 형상은 구조물이 최대로 견딜 수 있는 최대 지압 하중과 관련이 있다. ASTM D5961 standard[33]에서 규정한 기계적 체결 방식에 의해 발생하는 파손 형상은 Figure 3.19와 같다.

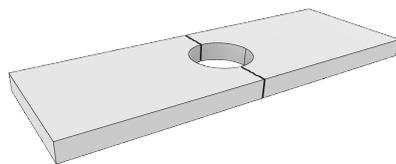
Net-tension failure mode는 하중을 지탱할 수 있는 섬유의 결핍이나 하중 방향으로의 섬유 배열이 부족한 경우 인장 강도가 충분하지 않아 발생하는 파손 형상이다. 또한 원공 노치를 제외한 폭이 충분하지 않아 발생하는 파손 형상이다.

Tear-out failure mode는 net-tension failure mode와 동일하게 하중 방향으로의 섬유 배열이 부족하여 인장 강도가 충분하지 않아 발생하는 파손 형상이다. 이때, 섬유의 적층 각도 중 45° 방향의 적층이 지배적일 때 주로 발생한다.

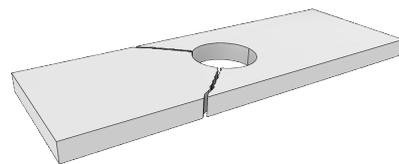
Shear-out failure mode는 하중이 작용할 때, 하중의 방향과 일정 각도를 가지며 지탱해 줄 수 있는 섬유의 결핍이나 전단 강도가 작용하는 인장 강도에 비해 작을 때 발생하는 파손 형상이다.

Cleavage failure mode는 하중이 전달될 때 길이 방향으로 crack이 진전되며 발생한다. 이때 하중 방향으로 crack이 생기면서 구조물에 모멘트가 발생하여 crack과 반대되는 쪽에 net-tension failure mode가 동시에 발생하는 파손 형상이다.

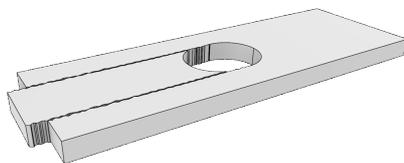
Bearing failure mode는 인장 강도나 전단 강도는 충분하나 구조물이 지탱할 수 있는 최대 지압 강도 이상의 하중이 전달되거나 응력 집중 현상이 나타나는 경우 발생하는 파손 형상이다.



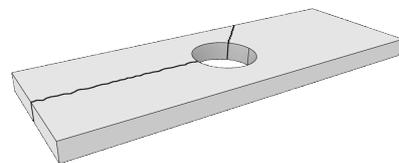
Net-tension failure mode



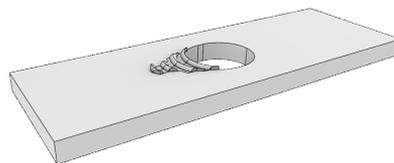
Tear-out failure mode



Shear-out failure mode



Cleavage failure mode



Bearing failure mode

Figure 3.19 Bearing test failure mode [33]

3D 프린트 복합재료 시편의 베어링 시험 후 파손 형상을 Table 3.3에 정리하여 나타내었다. 각 프린팅 방향, 원공 직경에 따라 다양한 파손 형상이 발견되었다. 그중 type 1-0° 시편의 경우 모든 원공 직경에 대하여 베어링 파손 형상이 발견되었다. 모두 동일한 베어링 파손 형상을 보이지만 Figure 3.20과 같이 원공 직경의 증가에 따라 손상 거리(L_B)가 감소함을 확인할 수 있다. 이는 핀과 시편의 접촉 면적의 증가로 인해 응력 집중 현상이 줄어들었기 때문이다. 다음으로 type 1-±45° 시편의 경우 5mm, 6mm와 8mm, 10mm 두 그룹으로 구분되어 파손 형상을 보인다. 이를 통해 $2.5 \leq W/D \leq 3.3$ 의 구간이 파손 형상의 임계 구간임을 확인할 수 있다. 또한 Type 1-90°, type 2-0°/±45°/90° 시편의 경우 모두 $2.0 \leq W/D \leq 2.5$ 의 구간이 파손 형상이 전이되는 임계 구간임을 시험 결과로부터 확인할 수 있다. 해당 임계 구간을 확인함으로써 원공 직경의 증가에 따라 최대 지압 하중이 증가하지 않는 원인을 확인할 수 있다.

시험 결과에서 다양한 파손 형상이 발견되었지만, 시편이 완전히 탈락되는 파단은 발견되지 않았다. 이는 시편의 끝단에 제작되는 wall layer가 시편의 탈락을 방지하기 때문이다.

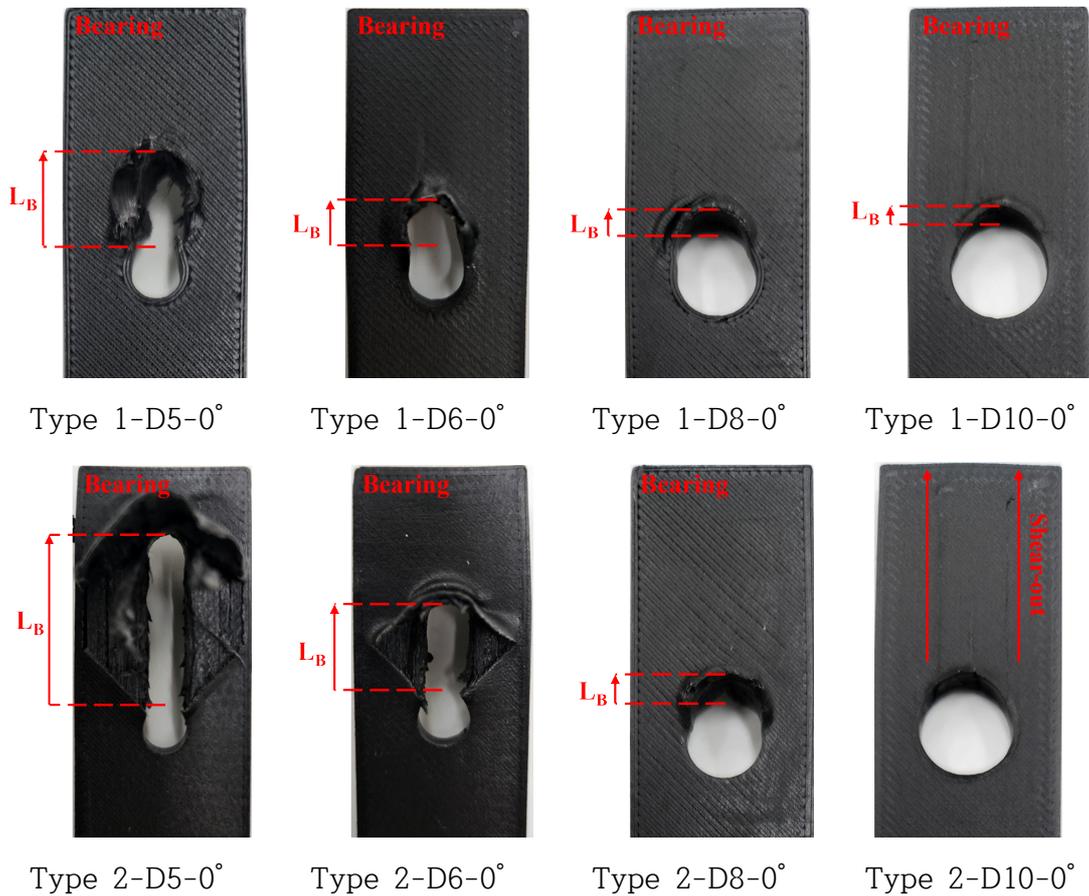


Figure 3.20 Failure mode of 3D printed bearing specimen(0°)

Table 3.3 Failure mode of 3D printed bearing specimen

		Hole diameter [W/D ratio]			
Type 1		5mm [4.0]	6mm [3.3]	8mm [2.5]	10mm [2.0]
0°	No. 1	B	B	B	B
	No. 2	B	B	B	B
	No. 3	B	-	B	B
±45°	No. 1	B	B	B+T	B+T
	No. 2	B	B	B+T	B+T
	No. 3	B	B	B+T	B+T
90°	No. 1	B+N	B	B	B+N
	No. 2	B+N	B	B+C	B+N
	No. 3	B+N	B+C	B	B+N
Type 2		5mm [4.0]	6mm [3.3]	8mm [2.5]	10mm [2.0]
0°	No. 1	B	B	B	S
	No. 2	B	B	B	S
	No. 3	B	B	B	S
±45°	No. 1	B+T	B+T	B	T
	No. 2	B+T	B+T	B	T
	No. 3	B+T	-	B	-
90°	No. 1	B+N	B+N	B+N	C
	No. 2	B+N	B+C	B+N	C
	No. 3	B+C	B+N	B+N	C

B: Bearing failure mode, S: Shear-out failure mode, N: Net-tension failure mode, C: Cleavage failure mode, T: Tear-out failure mode

제 4장 3D 프린트 물성 시험 시편의 유한요소해석 모델 개발

4.1 유한요소해석 모델

4.1.1 모델 치수

유한요소해석 모델 개발에 사용된 모델의 종류는 3D 프린트 복합재료의 물성을 파악하기 위한 물성 시험 모델 3종류와 3D 프린트 플라스틱 소재의 물성을 파악하기 위한 물성 시험 모델로 총 4가지이다. 3D 프린트 복합재료에 사용된 강화재의 종류는 carbon fiber filament, glass fiber filament, HSHT(High Strength High Temperature) glass fiber filament, kevlar fiber filament 4종류이다. 또한 3D 프린트 플라스틱 소재의 종류는 onyx filament와 nylon filament 2종류이다.

모델의 치수는 Figure 4.1-4.4와 같다. Figure 4.1의 길이 기준 0도 방향(x축 방향)으로 프린팅된 3D 프린트 복합재료 종방향 인장 시험 모델과 Figure 4.2의 90도 방향(y축 방향)으로 프린팅된 횡방향 인장 시험 모델은 ASTM D3039 standard[16]에 따라 모델링되었다. Figure 4.3의 ± 45 도 방향으로 프린팅된 전단 시험 모델은 ASTM D3518 standard[34]에 따라 모델링되었다. Figure 4.4의 플라스틱 소재만을 이용하여 제작된 인장 시험 모델은 ASTM D638 standard[35]에 따라 모델링되었다.

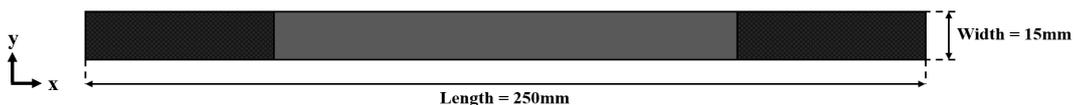


Figure 4.1 Dimension of tensile(0°) test model

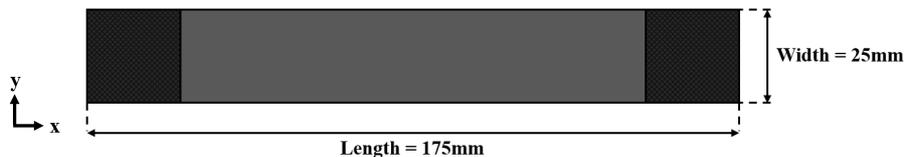


Figure 4.2 Dimension of tensile(90°) test model



Figure 4.3 Dimension of shear($\pm 45^\circ$) test model

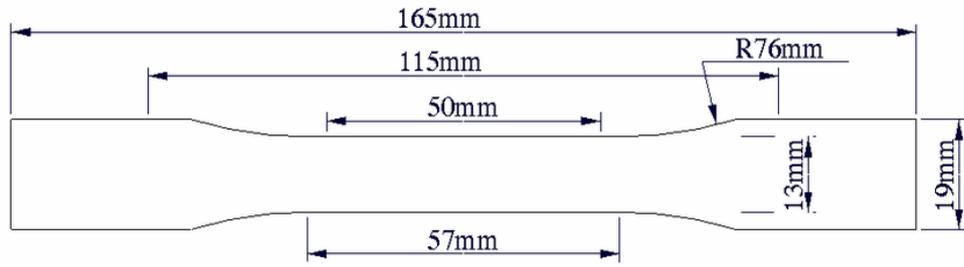


Figure 4.4 Dimension of plastic material tensile test model

유한요소해석 모델의 두께는 아래 Table 4.1-4.3과 같다. Carbon fiber filament를 사용하는 경우 1층을 적층할 때 0.125mm가 적층되며 이외의 강화재료 filament를 사용하는 경우 0.1mm로 적층된다.

Table 4.1 Laminate information of carbon fiber filament model

	Material	Printing direction	Total layer No.	Total layer thickness(mm)
Tensile test model(0°)	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
	Carbon fiber	[0°] ₈	8	1.0
	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
Tensile test model(90°)	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
	Carbon fiber	[0°] ₁₆	16	2.0
	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
Shear test model(±45°)	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5
	Carbon fiber	[±45°] _{4S}	16	2.0
	Onyx	[±45°] ₂	4	0.5

Table 4.2 Laminate information of other reinforcement filament model

	Material	Printing direction	Total layer No.	Total layer thickness(mm)
Tensile test model(0°)	Onyx	[+45°]	1	0.1
	Reinforcement	[0°] ₁₈	18	1.8
	Onyx	[-45°]	1	0.1
Tensile test model(90°)	Onyx	[+45°]	1	0.1
	Reinforcement	[90°] ₃₀	30	3.0
	Onyx	[-45°]	1	0.1
Shear test model(±45°)	Onyx	[+45°]	1	0.1
	Reinforcement	[±45°] _{5S}	20	2.0
	Onyx	[-45°]	1	0.1

Table 4.3 Laminate information of plastic filament model

Material	Printing direction	Total layer No.	Total layer thickness(mm)
Onyx	$[\pm 45^\circ]_{13}$	26	3.25
Nylon	$[\pm 45^\circ]_{13}$	26	3.25

4.1.2 유한요소모델

3D 프린트 복합재료의 물성을 파악하기 위한 물성 시험 모델 3종류와 3D 프린트 플라스틱 소재의 물성을 파악하기 위한 물성 시험 모델과 동일한 치수를 갖는 2D 유한요소 모델을 MSC Patran/Nastran 2018을 이용하여 모델링하였다. Patran/Nastran에서 모델링된 유한요소 모델은 Figure 4.5-4.8과 같다.



Figure 4.5 Finite element model of tensile(0°) test model

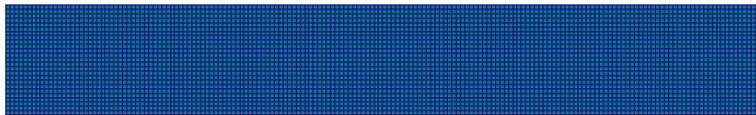


Figure 4.6 Finite element model of tensile(90°) test model

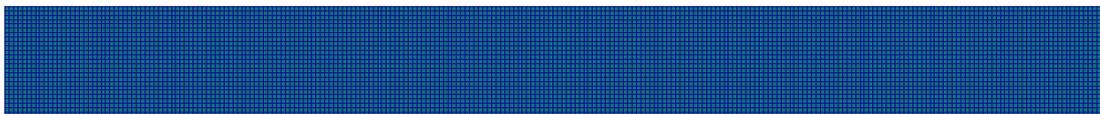


Figure 4.7 Finite element model of shear($\pm 45^\circ$) test model



Figure 4.8 Finite element model of plastic material tensile test model

4.2 유한요소해석 조건

4.2.1 물성 정보 및 파손 기준 조건

유한요소해석을 위한 물성 정보는 해석 모델과 동일한 치수로 제작된 3D 프린트 복합재료 및 플라스틱 재료 시편의 실험 결과를 통해 얻었다. 실험을 통해 얻은 유한요소해석용 물성 정보는 Table 4.4와 같다.

Table 4.4 Material properties for finite element analysis

Properties	Symbol	Unit	CF	GF	HSHT GF	Kevlar	Onyx	Nylon
Elastic modulus	E_1	GPa	41.11	23.10	23.3	32.6	1.61	1.06
	E_2	GPa	2.88	0.32	0.73	0.36	1.61	1.06
	E_3	GPa	2.88	0.32	0.73	0.36	1.61	1.06
Shear modulus	G_{12}	GPa	1.57	0.30	0.41	0.33	0.52	0.37
	G_{23}	GPa	0.59	0.11	0.15	0.12	0.52	0.37
	G_{31}	GPa	1.57	0.30	0.41	0.33	0.52	0.37
Poisson's ratio	ν_{12}	-	0.34	0.45	0.47	0.56	0.49	0.45
	ν_{23}	-	0.40	0.53	0.55	0.66	0.49	0.45
	ν_{31}	-	0.030	0.040	0.042	0.050	0.49	0.45
Tensile strength	S_1	MPa	450.70	390.00	377.50	457.90	36.13	21.1
	S_2	MPa	15.05	3.23	6.85	3.40	36.13	21.1
	S_3	MPa	15.05	3.23	6.85	3.40	36.13	21.1
Shear strength	S_{12}	MPa	52.62	33.30	125.40	132.50	46.27	27.02

1: Longitudinal(x-direction), 2: Transverse(y-direction), 3: Through thickness(z-direction)

복합재료에서 나타날 수 있는 파손 유형을 정밀하게 평가하기 위해서는 유한요소해석 시 파손 기준조건을 적용해야 한다. 복합재료의 파손기준은 크게 한계 기준(Limit Criteria), 상호 기준(Interactive Criteria), 분리 기준(Separate Mode Criteria)으로 구분된다. 이 중 연구를 위해 사용된 파손 기준은 상호기준 중 Tsai-Wu 파손 기준이다. Tsai-Wu 파손 기준은 복합재료 파손 평가 시 전체적인 Laminate의 재료적 물성(Fiber + Matrix)을 기준으로 하중 방향에(X_t, X_c, Y_t, Y_c, S) 대한 상관관계를 식(4.1)로 표현하여 파손을 평가하는 방식이다.

$$FI = \left[\begin{aligned} & \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right) \sigma_3 \\ & + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} \\ & + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 \end{aligned} \right] / F \quad \text{식(4.1)}$$

(여기서, 상관계수 F_{12}, F_{23}, F_{13} 은 다음과 같다.

$$F_{12}^2 < \frac{1}{X_t X_c} \cdot \frac{1}{Y_t Y_c} \quad F_{12}^2 < \frac{1}{X_t X_c} \cdot \frac{1}{Y_t Y_c} \quad F_{12}^2 < \frac{1}{X_t X_c} \cdot \frac{1}{Y_t Y_c}$$

Table 4.5 Input data for Tsai-Wu setup

Symbol	Content	Parameter	Remark
X_t, X_c	maximum allowable stresses in the 1-direction in tension and compression	V_1, V_2	
Y_t, Y_c	maximum allowable stresses in the 2-direction in tension and compression	V_3, V_4	
Z_t, Z_c	maximum allowable stresses in the 3-direction in tension and compression	V_5, V_6	
S_{12}	maximum allowable in-plane shear stress	V_7	
S_{23}	maximum allowable 23 shear stress	V_8	
S_{31}	maximum allowable 31 shear stress	V_9	
F_{12}	Interactive strength constant for the 12 plane	V_{10}	$V_{10}^2 < \frac{1}{V_1 V_2 V_3 V_4}$
F_{23}	Interactive strength constant for the 23 plane	V_{11}	$V_{11}^2 < \frac{1}{V_3 V_4 V_5 V_6}$
F_{31}	Interactive strength constant for the 31 plane	V_{12}	$V_{12}^2 < \frac{1}{V_1 V_2 V_5 V_6}$

4.2.2 경계/하중 조건

경계조건의 경우 물성을 얻기 위해 수행한 실험과 동일하게 설정하였다. 유한요소모델의 좌측 탭 길이 내에 해당하는 절점에 병진운동(T_x, T_y, T_z)과 회전운동(R_x, R_y, R_z) 모두를 고정하였다. 또한 유한요소모델의 우측 탭 길이 내에 해당하는 절점에 회전운동(R_x, R_y, R_z)을 구속하였다. 탭에 해당하는 절점의 범위는 실제 실험에서 지정한 탭의 범위와 일치시켰다. 다음 Table 4.6은 물성 시험 시편의 탭 치수이다.

Table 4.6 Dimension of tab for properties test

	Length (mm)	Width (mm)	ASTM standard
Tensile test model(0°)	56	15	ASTM D3039
Tensile test model(90°)	25	25	ASTM D3039
Shear test model(±45°)	56	25	ASTM D3518
Tensile test model for plastic model	25	19	ASTM D638

하중조건은 물성을 얻기 위해 수행한 실험에서 얻은 데이터를 기준으로 우측 탭 길이 내에 있는 요소에 적용하였다. 인장 시편(0°, 90°) 및 플라스틱 소재 물성 시편의 경우 실험의 최대 하중[N]에 따라 전체 하중을 적용하였으며, 전단 시편의 경우 ASTM D3518 standard[34]에 따라 전단 변형률의 5% 해당하는 변위[mm]를 적용하였다. 다음 Figure 4.9는 적용된 경계/하중조건을 나타낸다.

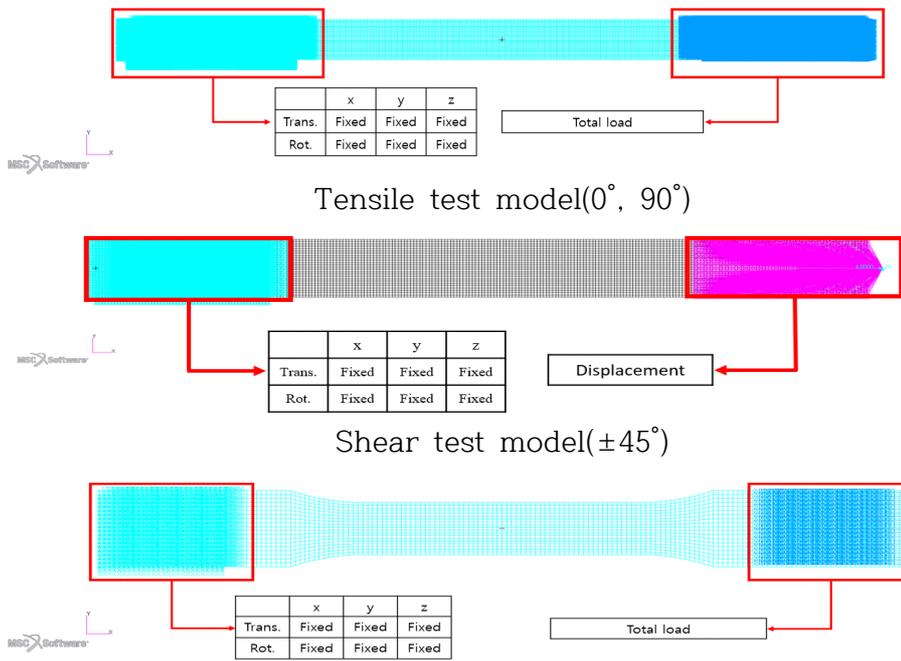


Figure 4.9 Load/Boundary conditions

4.3 유한요소해석 결과

강화재 4종(carbon fiber filament, glass fiber filament, HSHT glass fiber filament, kevlar fiber filament)을 이용하여 제작된 3D 프린트 복합재료와 플라스틱 소재 2종(onyx, nylon)을 이용하여 제작된 3D 프린트 플라스틱 소재의 유한요소해석 결과와 실험 결과와의 비교 응력-변형률 선도를 Figure 4.10-4.13에 나타내었다. 각 선도는 실험 종류에 따라 구분하여 나타내었다. 또한, 모든 소재와 실험 종류에 상관없이 모두 85% 이상의 일치도를 보이며, 이를 통해 유한요소 모델링이 잘 되었음을 확인하였다.

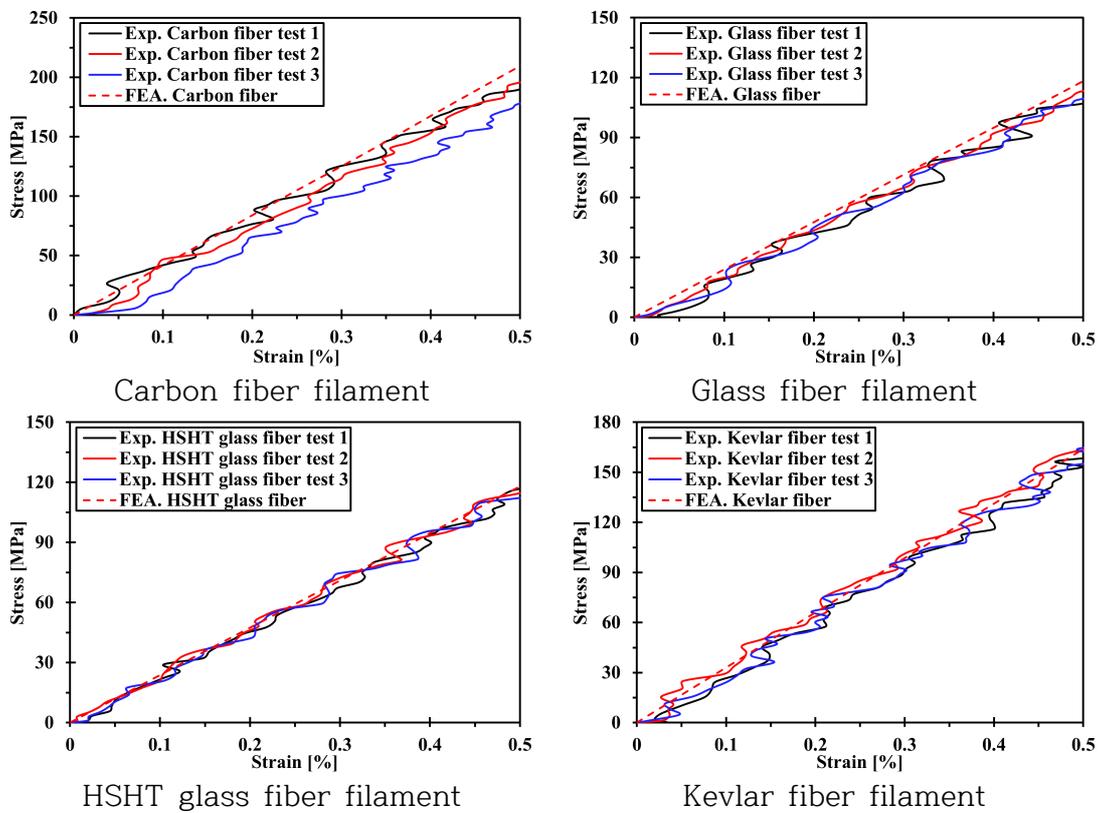
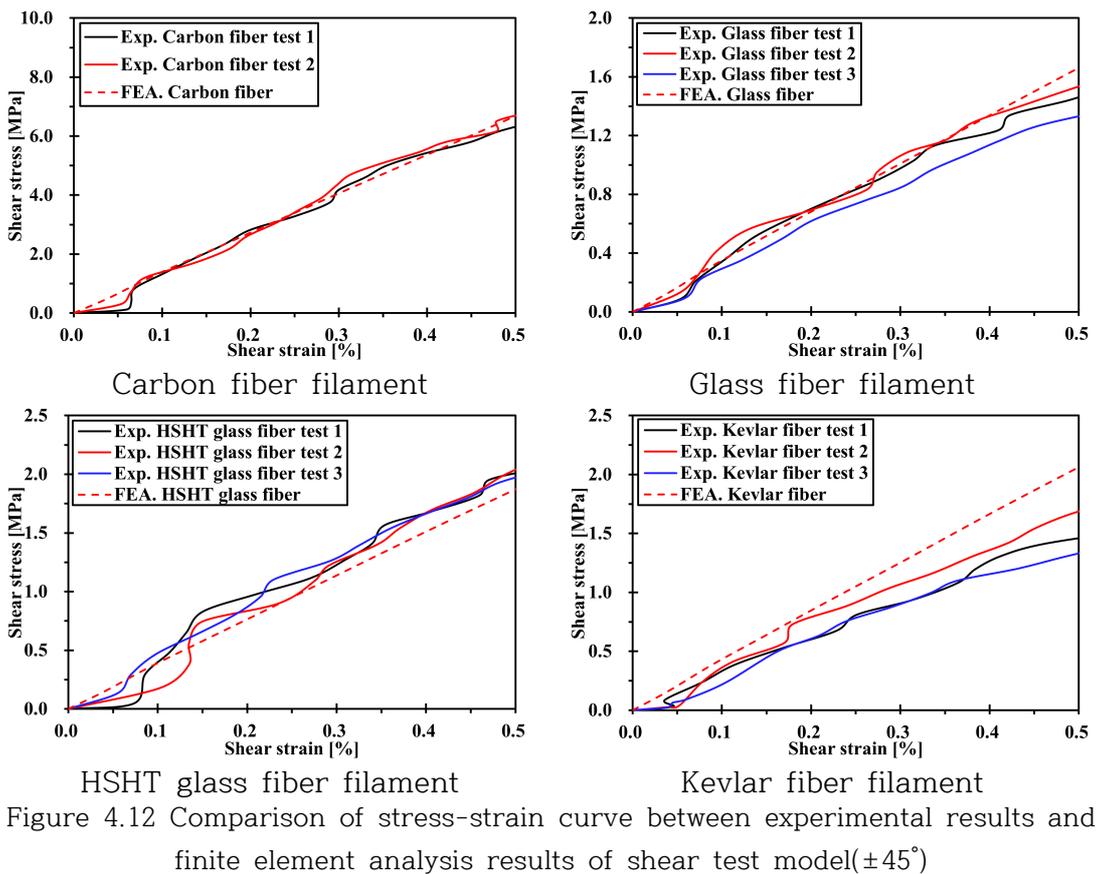
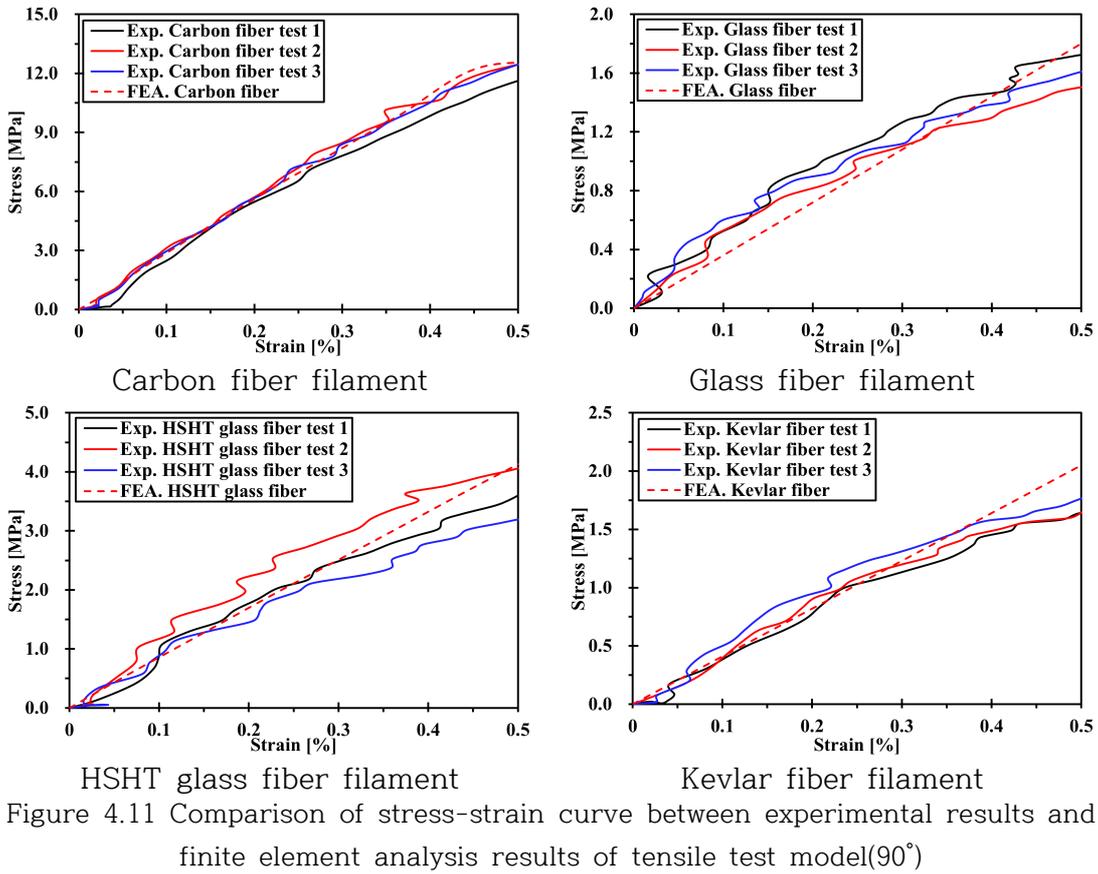


Figure 4.10 Comparison of stress-strain curve between experimental results and finite element analysis results of tensile test model(0°)



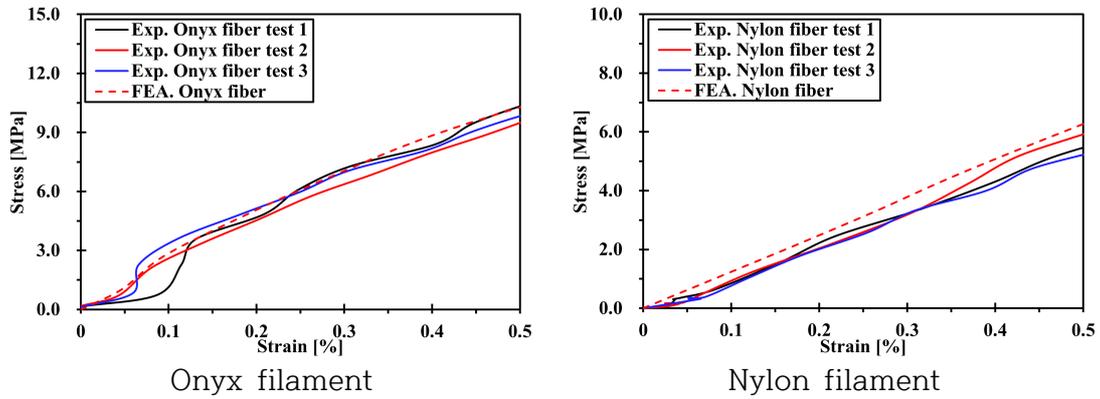


Figure 4.13 Comparison of stress-strain curve between experimental results and finite element analysis results of tensile test model for plastic model

파손 예측 형상은 파손 기준을 적용하는 경우에 확인할 수 있다. 따라서 파손 예측 형상을 확인하기 위해 유한요소 모델에 파손 기준을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이때, 강화재 필라멘트의 경우 이방성 소재임을 고려하여 Tsai-Wu 파손 기준을 적용하였으며 플라스틱 소재 필라멘트의 경우 등방성 소재이고 비선형 거동을 보이는 것을 고려하여 실험 결과 데이터를 파손 기준으로 적용하였다. 파손 기준을 적용하여 수행한 유한요소해석을 통해 얻은 3D 프린트 복합재료 모델의 파손 예측 형상과 실험 결과 파손 형상을 Figure 4.14-4.16에서 비교하였다. 파손 예측 형상과 실제 실험 후 파손 형상을 비교하였을 때 동일한 위치에서 파손이 발생하는 경향을 확인하였으며 이를 통해 연구를 통해 개발된 유한요소해석 모델이 타당함을 확인하였다.

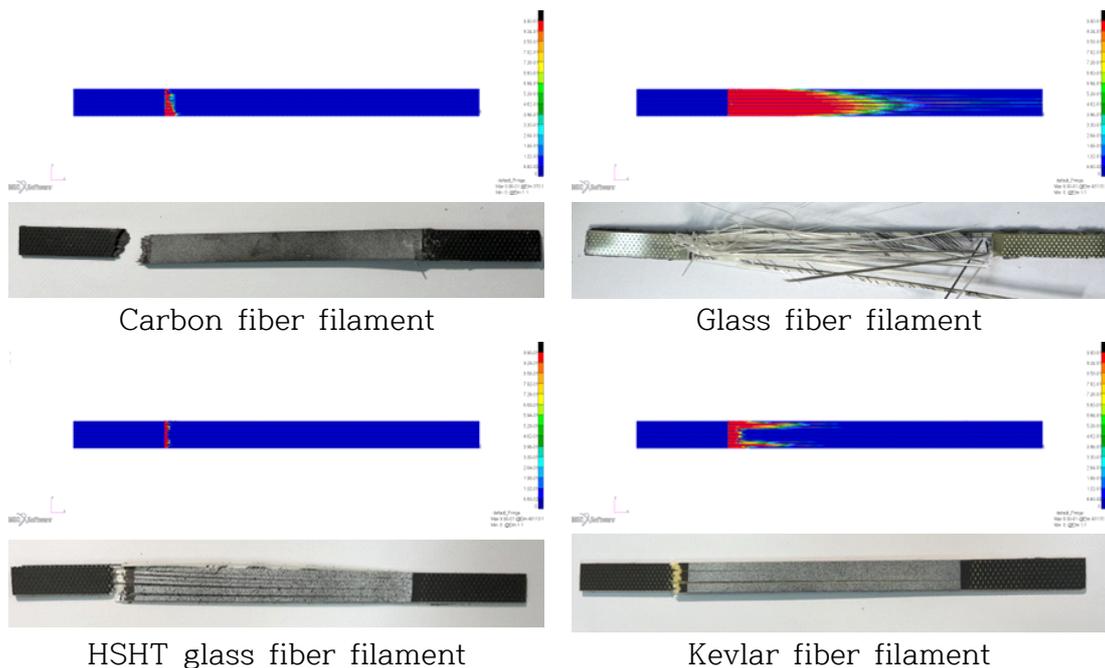
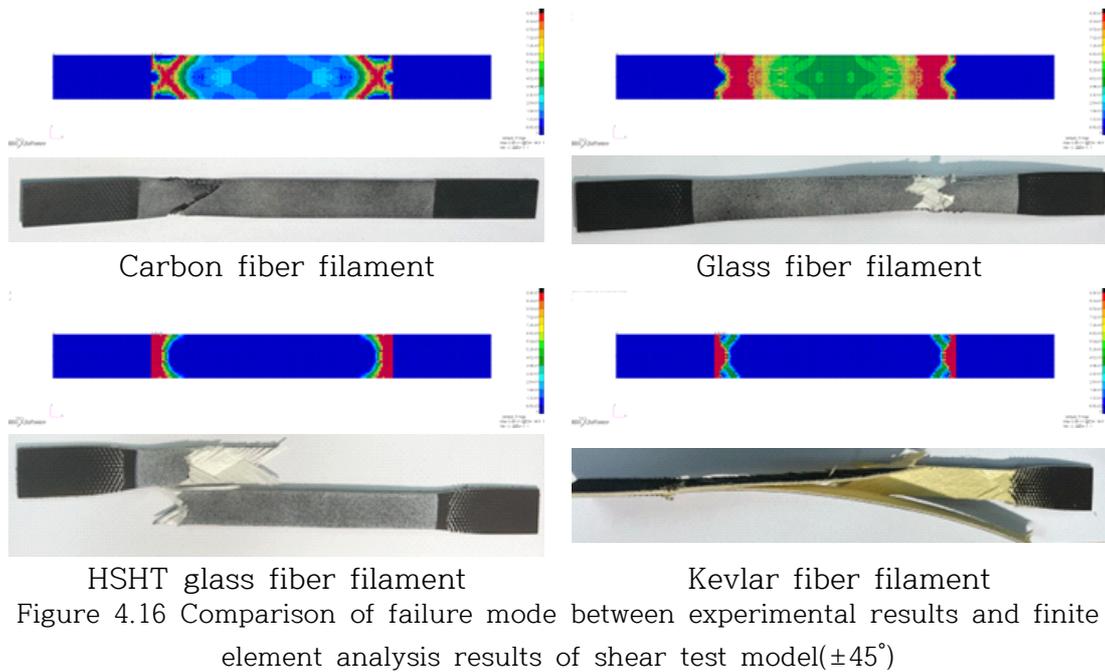
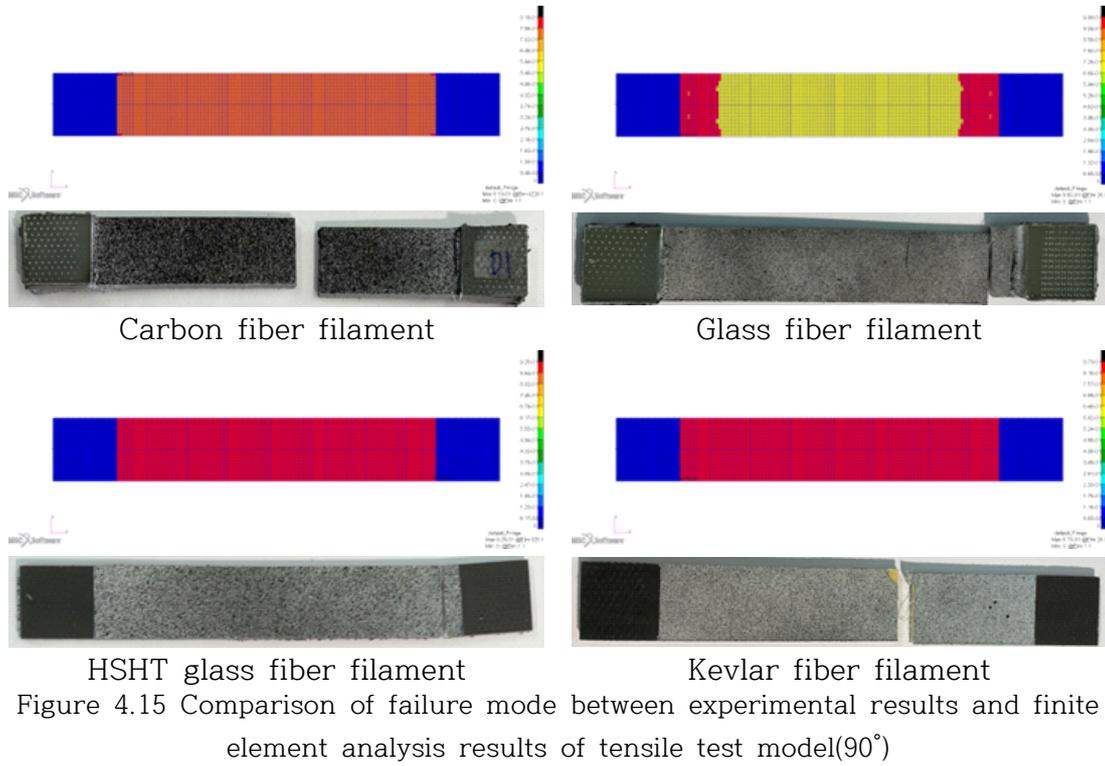


Figure 4.14 Comparison of failure mode between experimental results and finite element analysis results of tensile test model(0°)



제 5장 결론

본 연구에서는 우수한 비강도 및 비강성을 가지며 내부식성 등의 장점을 가지고 있는 복합재료와 경제적 생산이 가능하고 복잡한 형상에 대한 설계 및 제작이 수월한 3D 프린트 기술의 접합 기술인 3D 프린트 복합재료를 선박 및 해양 구조물에 적용하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫 번째, 대표적인 해양환경인 염수 환경에 노출된 3D 프린트 복합재료 시편의 wall layer 유무에 따른 기계적 강도를 평가하기 위해 wall layer가 있는 시편과 후가공을 통해 wall layer를 제거한 시편을 각각 염수 환경에 15일, 30일 동안 노출시켰다. 이후 염수에 노출된 시편의 인장 시험을 통해 인장강도를 평가하였다. 두 번째, 구조물의 효율적인 연결을 위해 3D 프린트로 제작된 복합재료 시편의 기계적 체결 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 프린팅 방향, 원공 노치 제작방법(3D 프린팅, 후가공), 기하학적 형상 변화라는 3가지 조건을 설정하였다. 세 번째, 3D 프린트 복합재료 시편의 유한요소해석 모델을 개발하기 위해 4가지 종류의 3D 프린트 복합재료 모델과 2가지 종류의 3D 프린트 플라스틱 소재 모델을 제작하였다. 제작한 모델에 실험을 통해 얻은 물성 정보를 적용하였으며 파손 유형을 정밀하게 평가하기 위해 Tsai-Wu 파손 기준을 적용하였다. 플라스틱 소재로 제작된 모델과 0°, 90° 방향으로 제작된 모델을 이용하여 인장 시험 조건과 동일하게 경계/하중 조건을 설정하였으며 ±45° 방향으로 제작된 모델을 이용하여 전단 시험 조건과 동일하게 경계/하중 조건을 설정하였다.

염수 분무 시험 결과, 염수 노출 기간의 증가는 3D 프린트 복합재료 시편의 인장 강도 감소에 영향을 주는 것을 확인하였다. 하지만 wall layer가 있는 시편의 경우 염수의 영향을 크게 받지 않지만 후가공을 통해 wall layer를 제거한 시편의 경우 염수 침투를 방지할 수 있는 구조물의 부재로 인해 염수 흡수율이 높고 인장강도 감소 폭이 비교적 높음을 알 수 있다. 다음으로 기계적 체결 강도 평가 결과, 0° 방향으로 프린팅된 시편의 경우 다른 각도로 프린팅된 시편에 비해 높은 지압 하중을 견딜 수 있음을 확인하였으며 원공 노치 제작 방식에 따른 시편의 기계적 체결 강도 차이는 크지 않음을 확인하였다. 또한 원공 직경이 증가할수록 더 높은 지압 하중을 견딜 수 있고 파손 형상이 변화하는 임계 구간에서는 지압 하중 값이 급격히 감소함을 확인하였다. 따라서 3D 프린트 복합재료를 활용하여 선박 및 해양구조물을 제작하는 경우 wall layer를 포함하여 구조물을 제작하는 것이 효율적이며 구조물의 프린팅 방향과 기하학적 영향을 고려하여 기계적 체결 방식을 적용해야 한다. 유한요소해석 결과 모든 소재와 실험 종류에 상관없이 인장 강도 및 계수, 파손 형상이 실험과 우수한 일치율을 보였다. 이를 통해 개발된 유한요소해석 모델이 타당함을 확인하였다.

본 연구를 통해 3D 프린트 복합재료의 해양환경에 대한 내구성 및 기계적 체결 강도에 대해 평가하였으며 기계적 강도를 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 이를 통해 선박/해양구조물에 대한 3D 프린트 복합재료의 적용 가능성을 평가하였다. 향후, 본 연구 결과와 함께 준등방성 적층 등을 갖는 시편에 대한 연구를 수행한다면 선박 및 해양구조물에 3D 프린트 복합재료를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Hodgson, A., Kelly, N., & Peel, D. (2013). Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: a dugong case study. *PloS one*, 8, 1-15.
- [2] Shukla, A., & Karki, H. (2016). Application of robotics in offshore oil and gas industry—A review Part II. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 508-524.
- [3] Yu, M., Venkidasalapathy, J. A., Shen, Y., Quddus, N., & Mannan, S. M. (2017). Bow-tie analysis of underwater robots in offshore oil and gas operations. *In Offshore technology conference*.
- [4] Terracciano, D. S., Bazzarello, L., Caiti, A., Costanzi, R., & Manzari, V. (2020). Marine robots for underwater surveillance. *Current Robotics Reports*, 1, 159-167.
- [5] Innopolis, 2021. 3D Printing Materials Market.
- [6] Li, H., Liu, B., Ge, L., Chen, Y., Zheng, H., & Fang, D. (2021). Mechanical performances of continuous carbon fiber reinforced PLA composites printed in vacuum. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109277.
- [7] Uşun, A., & Gümrük, R. (2021). The mechanical performance of the 3D printed composites produced with continuous carbon fiber reinforced filaments obtained via melt impregnation. *Additive Manufacturing*, 46, 102112.
- [8] Al Rashid, A., Ikram, H., & Koç, M. (2022). Additive manufacturing and mechanical performance of carbon fiber reinforced Polyamide-6 composites. *Materials Today: Proceedings*, 62, 6359-6363.
- [9] Markforged. Available online
- [10] Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2011). Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *Corrosion Science*, 53(1), 426-431.
- [11] Yan, L., & Chouw, N. (2015). Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications. *Construction and Building Materials*, 99, 118-127.
- [12] Othman, A. R., & Jadee, K. J. (2016). Specific bearing strength of bolted composite joint with different glass fiber reinforcement. *ARPJ Eng Appl Sci*, 11(20), 12039-12044.
- [13] Kim, D. U., Seo, H. S., & Jang, H. Y. (2021). Study on mechanical bearing strength and failure modes of composite materials for marine structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 726.
- [14] Calabrese, L., Fiore, V., Scalici, T., Bruzzaniti, P., & Valenza, A. (2019). Failure maps to assess bearing performances of glass composite laminates. *Polymer Composites*, 40(3), 1087-1096.
- [15] Markforged Material Data Sheet 2022. Available online: (20 Jan. 2022)
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTM D3039/D3039M-17); *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2017.
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Operating Salt Spray(Fog) Apparatus (ASTM B117-19); *ASTM International: West*

Conshohocken, PA, USA, 2019.

- [18] Yang, B., Zhang, J., Zhou, L., Lu, M., Liang, W., & Wang, Z. (2015). Effect of fiber surface modification on water absorption and hydrothermal aging behaviors of GF/pCBT composites. *Composites Part B: Engineering*, 82, 84-91.
- [19] Ronagh, H., & Saeed, N. (2017). Changes in mechanical properties of GFRP composite after exposure to warm seawater. *Journal of Composite Materials*, 51(19), 2733-2742.
- [20] Ding, A., Wang, J., Ni, A., & Li, S. (2019). Assessment on the ageing of sandwich composites with vinylester-based composite faces and PVC foam core in various harsh environments. *Composite Structures*, 213, 71-81.
- [21] Batista, N. L., Rezende, M. C., & C. Botelho, E. (2021). The influence of crystallinity on the weather resistance of CF/PEEK composites. *Applied Composite Materials*, 28, 235-246.
- [22] Fiore, V., Scalici, T., Calabrese, L., Valenza, A., & Proverbio, E. (2016). Effect of external basalt layers on durability behaviour of flax reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 84, 258-265.
- [23] Fiore, V., Scalici, T., Calabrese, L., Valenza, A., & La Bella, G. (2015). Durability of flex-basalt hybrid composites for marine applications. *In International conference on composite materials, Copenhagen*.
- [24] Korach, C. S., & Chiang, F. P. (2012, June). Characterization of carbon fiber-vinylester composites exposed to combined UV radiation and salt spray. *In 15th European Conference on Composite Materials (ECCM15), Venice, Italy*, 24-28.
- [25] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics (ASTM D570-22); *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022*.
- [26] Fiore, V., Calabrese, L., Proverbio, E., Passari, R., & Valenza, A. (2017). Salt spray fog ageing of hybrid composite/metal rivet joints for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*, 108, 65-74.
- [27] Gellert, E. P., & Turley, D. M. (1999). Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(11), 1259-1265.
- [28] Muflikhun, M. A., & Fiedler, B. (2022). Failure Prediction and Surface Characterization of GFRP Laminates: A Study of Stepwise Loading. *Polymers*, 14(20), 4322.
- [29] Mahmud, J., Hussain, A. K., Rahimi, N., & Rahim, M. A. (2013). Failure analysis of composite laminate based on experiment-simulation integration. *Current Research in Malaysia*, 2(2), 7-22.
- [30] Muflikhun, M. A., & Yokozeki, T. (2023). Systematic analysis of fractured specimens of composite laminates: different perspectives between tensile, flexural, Mode I, and Mode II test. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*.
- [31] Wu, X. F., & Dzenis, Y. A. (2005). Experimental determination of probabilistic edge-delamination strength of a graphite-fiber/epoxy composite. *Composite*

- structures*, 70(1), 100-108.
- [32] Behera, R. P., Rawat, P., & Singh, K. K. (2018). Tensile behavior of three phased glass/epoxy laminate embedded with MWCNTs: An experimental approach. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8176-8183.
- [33] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates (ASTM D5961/D5961M-17); *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2017.
- [34] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate (ASTM D3518/D3518M-18); *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2018.
- [35] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638-22); *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, 2022.

Study of mechanical performance of 3D printed composite material for ship/marine structure

Do-Hyeon Kim

School of Naval Architecture and Ocean Engineering
University of Ulsan, Ulsan, Korea

Abstract

Recently, interest in eco-friendly and smart ships is increasing in the shipbuilding and marine industries according to the environmental regulations of the International Maritime Organization. In particular, in order to increase fuel efficiency through weight reduction, research on the application of related composite materials is being actively conducted. In addition, interest in 3D printed composites, which are smart materials that are easy to manufacture and have the advantage of a fast production process, is increasing.

For the application of 3D printed composites to shipbuilding and offshore structures, it is necessary to study the structural analysis data of 3D printed composites and the mechanical performance of 3D printed composites in the marine environment. Among various marine environments, the effect on the saltwater environment needs to be studied for the application of materials. In addition, in the case of 3D printed composite materials, a mechanical fastening method must be used because it cannot be connected to other metal structures using welding, so research on mechanical fastening is also necessary.

Therefore, in this study, the mechanical performance of the 3D printed composite material specimen exposed to the salt water environment was evaluated, and the mechanical fastening strength evaluation for the mechanical fastening method was experimentally studied. In addition, a finite element analysis model that can predict the mechanical strength of 3D printed composite material structures was developed. In order to evaluate the effect of the saltwater environment and mechanical fastening strength and develop a finite element analysis model, composite material specimens were produced using 3D printing, and in the case of experiments, mechanical tests were performed on the manufactured

specimens using a universal testing machine. After the test, the mechanical fastening strength according to the diameter of the hole notch and the tensile strength changed according to the influence of the salt water environment were compared/analyzed. In addition, after the test evaluation, the failure mode of the specimen was checked to analyze the relationship between the mechanical strength and the failure mode of the 3D printed composite material.