



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

탄소섬유강화 복합재료 리벳의
유도가열을 통한 박리 보수 및
체결강도 증가

Repairment of delamination and increase of
fastening strength using induction heating of
CFRTP rivet

2023년 2월

서울대학교 대학원

재료공학부

정 인 준

탄소섬유강화 복합재료 리벳의
유도가열을 통한 박리 보수 및
체결강도 증가

Repairment of delamination and increase of
fastening strength using induction heating of
CFRTP rivet

지도 교수 유 응 열

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2022 년 12 월

서울대학교 대학원
재료공학부
정 인 준

정인준의 공학석사 학위논문을 인준함
2022 년 12 월

위 원 장 _____ 안 철 희 _____ (인)

부위원장 _____ 유 응 열 _____ (인)

위 원 _____ 이 명 규 _____ (인)

초 록

탄소섬유강화 복합재료(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)는 경량성, 고강도, 고강성, 피로 특성, 내식성 등의 장점으로 건축 및 토목, 항공기, 자동차, 풍력 발전기 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 특히 항공기 분야에서 경량화를 위해 항공기의 날개, 수평 및 수직 안정판 등의 금속 부품을 대체하고 있다. 하지만 복합재료의 비싼 가격과 제조의 어려움으로 인해 단일 부품으로 항공기 제작이 불가하며 수많은 부품의 접합을 통해 항공기가 제작된다. 이때 항공기 접합 시 볼트나 리벳과 같은 금속 체결 부품을 이용하여 조립된다. 금속 체결 부품은 항공기 무게를 증가시키고 수분 환경 노출 시 부식의 가능성이 있으며, 탄소섬유강화 복합재료와 열팽창계수가 달라 고온에서 치수가 불안정해진다. 또한 체결 부품 삽입을 위한 체결 구멍 가공 시 박리 등의 결함이 발생한다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 열가소성 탄소섬유강화 복합재료(Carbon fiber reinforced thermoplastic, CFRTP) 리벳을 개발하였다. CFRTP 리벳을 통해 금속 체결 부품의 단점을 해결하고 드릴링에 의한 박리 보수와 함께 체결강도 증가를 목표로하였다. CFRTP 리벳의 체결을 위해 고주파수 조건 하에서 유도가열하여 용융점 이상의 온도로 가열하였으며, 용융된 고분자 수지의 유동, 압밀 및 냉각 과정을 거쳐 체결을 진행하였다. 이때 체결과 동시에 용융된 고분자 수지가 드릴링에 의한 박리 사이로 주입되어 보수된다. 또한 CFRTP 리벳의 기계적 강도를 평가하기 위해 알루미늄 리벳과 비교하여 물성 평가를 진행하였다.

섬유강화 복합재료 적층판의 드릴링 결과, 체결 구멍의 출구 부분과 드릴이 관통하는 절삭면에 표면 갈라짐, 섬유의 뿔힘, 균열 및 박리 등의 결함이 관측되었다. CFRTP 리벳의 체결과 드릴링에 의한 결함을 보수하기 위해 215~220 kHz의 고주파수 조건 하에서 전력을 변화시켜 용융점 이상의 온도로 유도 가열하였다. 유도가열을 통해 용융점 이상의 온도로 가열된 CFRTP 리벳이 체결되었으며, 체결과 동시에 박리를 포함한 결함 사이로 용융된 수지가 주입되어 보수되었다. 또한 CFRTP 리벳의 기계적 물성 평가를 진행한 결과, 알루미늄 리벳과 비교하여 유사하거나 더 높은 물성을 나타내었다.

이를 통해 개발한 유도가열이 가능한 CFRTP 리벳이 금속 리벳을 대체하여 경량화, 고강도, 고강성, 내식성 등의 장점을 가지며 박리를 보수하여 물성 저하 및 부품의 폐기를 방지할 수 있음을 확인하였다.

**주요어 : 탄소섬유강화 복합재료, 기계적 체결, 유도가열, 박리 보수,
체결강도 증가**

학 번 : 2021-20204

목 차

제 1 장 서론.....	1
제 1 절 연구의 배경.....	1
1.1.1 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)의 정의.....	1
1.1.2 항공산업에서의 섬유강화 복합재료 사용.....	2
1.1.3 섬유강화 복합재료 접합 공정.....	3
1.1.4 기계적 체결 문제 해결방안.....	7
1.1.5 탄소섬유강화 복합재료 유도가열 메커니즘.....	12
1.1.6 연구의 목표.....	17
제 2 절 연구의 내용.....	18
1.2.1 유도가열 및 물성 향상을 위한 조건 설정.....	18
1.2.2 CFRTP 리벳 및 체결 판재 제작.....	19
1.2.3 유도가열을 통한 CFRTP 리벳 체결.....	20
1.2.4 분석.....	21
1.2.5 기계적 물성 평가.....	21
제 2 장 실 험.....	23
제 1 절 CFRTP 리벳 제작.....	23
2.1.1 유도가열 및 물성 향상을 위한 조건 설정.....	23
2.1.2 CFRTP 리벳 및 체결 판재 제작.....	27
제 2 절 CFRTP 리벳 유도가열 및 체결.....	30

제 3 절	관찰.....	32
제 4 절	기계적 물성 평가.....	33
	2.4.1 단일 중첩 전단시험 (Single lap shear test)	33
	2.4.2 3점 굽힘시험 (3 point bending test)	34
제 3 장	결 과.....	36
제 1 절	유도가열 및 물성 향상을 위한 조건 설정	36
	3.1.1 유도가열 결과.....	36
	3.1.2 전기전도도 결과	38
	3.1.3 충격강도 결과.....	39
제 2 절	CFRTP 리벳 및 체결 판재	42
	3.2.1 CFRTP 리벳.....	42
	3.2.2 체결 판재 드릴링에 의한 결함	45
제 3 절	CFRTP 리벳 체결 및 박리 보수.....	48
	3.3.1 CFRTP 리벳 체결	48
	3.3.2 박리 보수 평가.....	52
제 4 절	기계적 물성	55
	3.4.1 베어링강도(Bearing strength).....	55
	3.4.2 굴곡강도(Flexural strength)	62
	3.4.3 기계적 물성 평가 요약.....	69

제 4 장 결 론..... 71

참고문헌..... 73

Abstract..... 77

표 목차

[표 1] 유도가열 효율에 영향을 미치는 매개변수	10
[표 2] GNP, CB, MWCNT 기반 폴리우레탄 하이브리드 나노 복합재료의 전기적 및 기계적 특성 요약	11
[표 3] 유도가열 메커니즘 및 관련 요소	13
[표 4] 유도가열 조건	24
[표 5] CFRTP 리벳 제작 시 사용된 재료의 물성	28
[표 6] 유도가열 결과	37
[표 7] 전력 변화에 따른 CFRTP 리벳과 체결 판재의 가열 온도	51
[표 8] 기계적 물성 평가 요약	69

그림 목차

[그림 1] 차세대 항공기에서의 복합재료 사용현황	2
[그림 2] (a) 섬유강화 복합재료의 드릴링에 의한 결함, (b) 드릴링에 의한 박리 발생 영역	5
[그림 3] CFRTP 체결 부품 체결 과정	10
[그림 4] 유도가열 메커니즘. (a) 와전류 손실, (b) 히스테리시스 손실.	14
[그림 5] 탄소섬유강화 복합재료 유도가열 메커니즘	16
[그림 6] 시편 저항 측정	25
[그림 7] 아이조드 충격 시험	26

[그림 8] CFRTP 리벳 제작 공정.	28
[그림 9] 체결 판재 제작. (a) 탄소섬유강화 복합재료 적층판 모식도, (b) 오토클레이브 모식도, (c) 공정 조건.....	29
[그림 10] 유도가열. (a) 단일 중첩 전단 시편, (b) 굽힘 시편	31
[그림 11] CFRTP 리벳 체결 공정.	31
[그림 12] 단일 중첩 전단시험 시편 규격.....	35
[그림 13] 3점 굽힘시험 시편 규격.....	35
[그림 14] 유도가열 예비실험 결과.....	37
[그림 15] MWCNT 함량에 따른 전기전도도.	38
[그림 16] MWCNT 분산에 따른 전기전도경로 형성.	39
[그림 17] MWCNT 함량에 따른 충격강도.	40
[그림 18] MWCNT 함량별 아이조드 파단면.....	41
[그림 19] CFRTP 리벳 단면. (디지털 현미경 관측)	42
[그림 20] CFRTP 리벳 XZ 방향 내부 분석. (XRM 관측)	43
[그림 21] CFRTP 리벳 XY 방향 내부 분석. (XRM 관측).....	44
[그림 22] 드릴링에 의한 결함 관측. (디지털 현미경 관측) (a) 드릴 출구(30배), (b) 절삭면(30배), (c) 절삭면(200배).	46
[그림 23] 드릴링에 의한 결함 관측. (Micro CT 관측) (a) XZ 방향, (b) XY 방향.....	47
[그림 24] 단일 중첩 전단 시편 유도가열. (a) 전력에 따른 가열 경향, (b) 220 kHz / 4.78 kW 유도가열 결과.....	49
[그림 25] 3점 굽힘 시편 유도가열. (a) 전력에 따른 가열 경향, (b) 215 kHz / 6.3 kW 유도가열 결과.	50

[그림 26] 박리 보수 관측. (Micro CT 관측)	53
[그림 27] 박리 보수 관측. (디지털 현미경 관측).....	54
[그림 28] 알루미늄 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프....	58
[그림 29] CFRTP 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프....	59
[그림 30] 알루미늄 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프....	60
[그림 31] CFRTP 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프.	61
[그림 32] 알루미늄 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 굽힘시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.....	64
[그림 33] CFRTP 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 굽힘시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.....	65
[그림 34] 알루미늄 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 굽힘시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.....	66
[그림 35] CFRTP 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 굽힘시험 결과.. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프	67
[그림 36] 굽힘시험에 따른 파단면. (a) CFRTP 시편, (b) GFRP 시편.	68
[그림 37] 기계적 물성 평가 요약. (a) 단일 중첩 전단시험, (b) 굽힘시험.....	70

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

1.1.1 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)의 정의

복합재료(Composite)란 두 가지 이상의 재료가 조합되어 물리적, 화학적으로 서로 다른 상을 형성하면서 원래의 소재보다 우수한 성능을 발현하는 재료를 말한다[1-4]. 복합재료는 섬유, 입자 등의 강화재와 금속, 고분자, 세라믹 등의 기지재로 구성된다. 그중 탄소섬유강화 복합재료(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)는 탄소섬유를 강화재로 고분자를 기지재로 사용한 복합재료로 경량성, 고강도, 고강성, 내충격성, 피로특성, 내식성 등 수많은 장점으로 금속을 대체하여 건축, 항공기, 자동차, 스포츠 및 레저, 풍력발전기 날개 등에 사용된다[1-8].

기지재가 고분자인 복합재료는 열경화성(Thermoset) 복합재료와 열가소성(Thermoplastic) 복합재료로 분류된다[3, 9, 10]. 열경화성 수지는 열을 가하여 성형한 후 다시 열을 가해도 형태가 변하지 않는 수지로 기계적 성질이 우수하며, 내열성, 내용제성, 내약품성, 내크리프성 등의 장점이 있지만 취성, 균열의 발생 및 균열 성장에 대한 낮은 저항성, 높은 수분 흡수율, 낮은 저장 수명 등의 단점이 있다[2, 11]. 열가소성 수지는 열을 가하여 성형한 뒤에도 다시 열을 가하면 형태를 변형시킬 수 있는 수지로 진동감쇠성, 파괴인성, 난연성, 내충격성, 내화학성, 피로 성능 등이 우수하며 넓은 온도 범위에서의 사용이 가능하다. 또한 단시간내 성형이 가능하며 재활용 및 수리 가능성의 장점이 있다[2, 9, 10, 12, 13].

1.1.2 항공산업에서의 섬유강화 복합재료 사용

항공기는 경량성, 고강도, 고신뢰성이 필수 요소 특성으로 요구되며 항공 운행 중 엔진부를 제외한 기체구조에서 약 80℃의 표면 온도까지 도달하고, 순항고도에서는 최대 -73℃의 온도 환경에 노출되므로 넓은 온도 영역에 만족할 수 있는 역학적 특성이 보증되어야 한다[14-16]. 섬유강화 복합재료는 이러한 특성을 만족하는 소재로 항공산업에서 금속 재료를 대체하여 항공기 수평 수직 안정판, 날개 패널 등에서 사용이 증가하고 있다. 현재 Airbus A350, Boeing 787 항공기의 전체 중량 50% 이상이 섬유강화 복합재료로 제작된다[4, 8, 17, 18]. 하지만 섬유강화 복합재료로 항공기 제작 시 비싼 가격과 제조의 어려움으로 인해 항공기를 단일 부품으로 제작할 수 없으며, 수많은 부품을 접합하여 항공기가 제작된다. 항공기는 접합 시 리벳 등의 체결 부품을 이용하여 조립되는데, 이때 소형 항공기는 십 만개 이상의 체결 구멍이 필요하며, 대형 항공기는 백만 개 이상의 체결 구멍이 필요하다[1, 6, 18, 19].

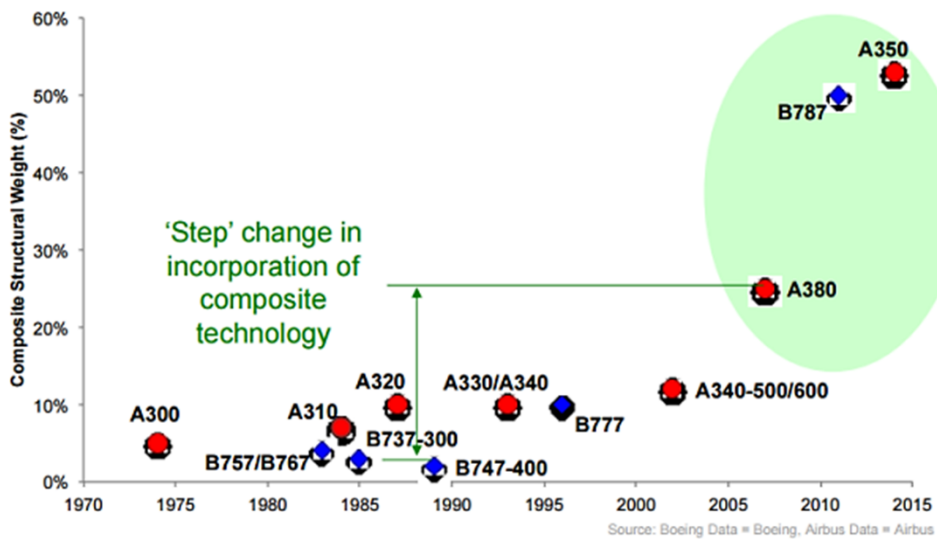


그림 1. 차세대 항공기에서의 복합재료 사용현황. 출처: [8]

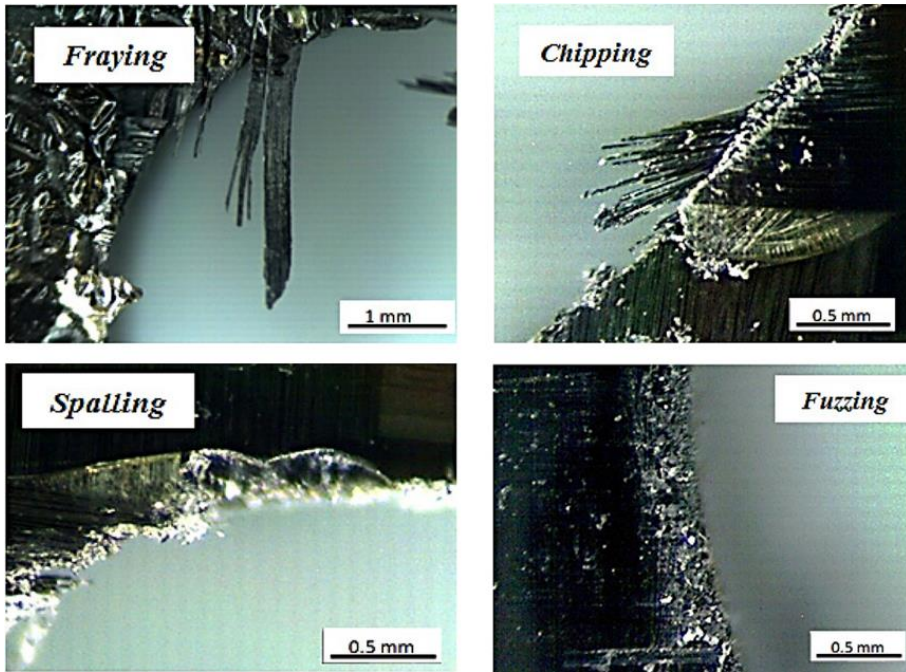
1.1.3 섬유강화 복합재료 접합 공정

섬유강화 복합재료의 접합 공정은 접착(Adhesive), 용접(Fusion), 기계적 체결(Mechanical fastening) 방식으로 분류된다. 접착 방법은 접착제를 사용하여 두 구성요소를 결합하는 과정으로 피로강도가 우수하고 응력 분포가 균일하다. 하지만 접착 시 먼지나 이물질과 같은 작업환경을 지양해야 하며, 접착력을 높이기 위해 접착 부위에 물리적 또는 화학적 표면처리가 필요하다. 또한 접착제 경화까지 오랜 시간이 걸리며 재료의 손상 없이 분해가 불가능하다는 문제점이 있다. 용접 방법은 전자기, 마찰, 열 등을 이용하여 접합부를 고온의 열로 용융하여 두 구성요소를 결합하는 과정으로 작업속도가 빠르며, 크고 복잡한 구조물 결합에 효과적이며 결합한 계면에서만 열이 발생하기 때문에 표면 손상이 최소화된다. 하지만 용접이 가능한 최대 두께의 제한으로 인해 적용 범위가 제한된다. 기계적 체결 방법은 결합할 구성요소에 드릴링을 통해 체결 구멍을 가공 후 체결 부품으로 두 구성요소를 결합하는 과정이다. 기계적 체결 방법은 다른 접합 방법에 비해 수리 및 점검을 위한 조립, 분해가 용이하며 항공기의 구조, 강도, 성능에 대하여 비행하기에 적합하다는 감항인증을 받아 안전성과 신뢰성이 높다[10, 16, 20, 21]. 또한 항공기는 제조 현장과 조립 현장 사이 운송으로 인한 하중 지지 조인트가 의무화 되어있으며, 그밖에 다양한 고하중 구조물에서도 기계적 체결 방식이 사용된다[22]. 하지만 기계적 체결 방식은 다양한 문제점이 존재한다.

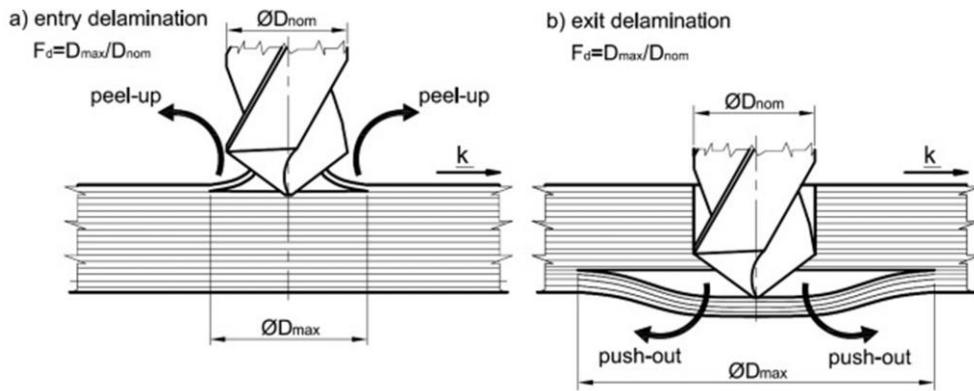
첫째, 기존 항공기에 사용되는 체결 부품은 금속의 재질로 수분 환경 노출 시 부식의 가능성이 있으며, 항공기의 외판인 섬유강화 복합재료와 열팽창계수가 달라 고온 환경에서 치수가 불안정해진다. 또한 금속의 체결 부품은 전기전도성이 높아 낙뢰 발생 시 항공기 내부로 전기 전도성 경로가 생성되는데, 이를 방지하기 위해 절연

재료로 밀봉(Encapsulation)되기 때문에 항공기의 전체 무게를 증가시킨다. 둘째, 기계적 체결 방식은 드릴 등의 기계 가공에 의한 체결 구멍이 필수적이다. 섬유강화 복합재료의 드릴 가공 시 섬유의 이질성, 이방성, 고마모성 및 단단한 성질로 인하여 결함이 발생한다. 그림 2의 (a)와 같이 결합할 판재의 박리(Delamination)를 포함하여 섬유의 뽑힘(Fiber pull out), 섬유가 닳아 헤어짐(Fiber fraying), 균열 발생 및 표면 갈라짐(Spalling), 섬유의 조각 및 단편(Chipping), 섬유의 부스러기(Fuzzing) 등의 다양한 결함을 야기한다[1, 3, 5, 6, 18].

드릴링에 의한 결함은 그림 2의 (b)와 같이 체결 구멍의 입구, 출구 및 드릴이 관통하는 절삭 면에서 발생한다[1, 6, 18]. 구멍의 입구에서 발생하는 필 업(Peel up) 박리 영역은 드릴이 복합재료 표면에 근접하여 절단함에 따라 복합재료 맨 위층이 나선형으로 올라가는 영역이다. 드릴이 복합재료를 관통하면서 두께가 감소하며 드릴 아래의 절단되지 않은 층은 드릴의 이송력으로 인해 변형에 대한 저항력을 잃는다. 드릴이 출구 지점에 도달하게 되면 푸시다운(Push down) 박리 영역이 발생하게 되는데, 이는 드릴의 높은 회전 및 이송 상태에서 복합재료에 힘을 가하여 층간 접합강도가 감소하면서 발생하는 영역이다. 푸시다운 박리는 필 업 박리보다 빈번하게 관찰이 되며, 손상 정도가 더 심하다[6, 18]. 이는 드릴에 의해 가해지는 추진력이 더 높을수록 층간 결합 강도가 감소하기 때문이다. 연구에 따르면 항공기 기체의 피로 파손 사고의 약 70%가 부품간 접합부에서 발생하며, 피로 균열의 약 80%가 접합부 구멍에서 발생한다. 또한 조립 공정에서 최대 60%의 부품 불량은 박리로 인하여 발생한다[1, 18, 19]. 박리를 포함한 다양한 결함은 구성요소의 강도 저하와 함께 피로 하중 하에서 성능저하를 야기하며, 결과적으로 부품의 폐기로 이어진다. 이에 따라 섬유강화 복합재료의 드릴링 시 발생하는 결함을 해결해야 하는 필요성이 있다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 섬유강화 복합재료의 드릴링에 의한 결함,

(b) 드릴링에 의한 박리 발생 영역. 출처: [23, 24]

드릴의 기계가공에 의해 발생하는 결함을 해결하기 위한 기존 연구는 드릴의 회전속도를 조절하거나 드릴 도구의 형상이나 재질을 변화하거나 드릴의 코팅을 통하여 결함의 발생 및 표면 손상을 최소화하여 체결 구멍의 품질을 개선하는 연구를 진행하였다. Geier et al.[23]은 절삭공구 및 적층된 층에 작용하는 절삭력, 절삭 토크 등의 기계 가공성, 드릴 공구의 요구사항과 형상 및 코팅, 가공 기술과 같은 최신 산업 해결방안을 포함한 탄소섬유강화 복합재료 드릴링의 공구 및 기술을 요약하였다. Liu et al.[25]은 섬유강화 복합재료의 박리 개선을 위해 드릴링 작업(일반, 연마, 진동 비틀림 및 고속 드릴링), 드릴 형상 및 재료, 드릴링에 의한 박리 및 억제 방법, 추력 및 도구 마모 등에 관해 요약하였다. Khashaba[26]는 이송 및 회전속도, 공구의 마모, 드릴 비트의 형상 등의 가공성 매개변수와 해석적 손상 모델 및 섬유강화 복합재료 드릴링에서 박리에 영향을 미치는 다양한 요인에 관한 연구를 요약하였다. Wang et al.[27]은 텅스텐 카바이드 재질의 드릴 비트를 사용하여 탄소섬유강화 복합재료를 드릴링하였다. 이때 드릴 비트에 다이아몬드와 AlTiN를 코팅하여 드릴링을 진행한 결과, 다이아몬드로 코팅한 드릴 비트가 모서리 부분의 마모를 줄이는데 효과적임을 입증하였다. 하지만 앞선 기존 연구들은 드릴링에 의한 결함 발생을 최소화할 뿐, 근본적인 해결 방법이 아니다. 또한 드릴의 회전속도에 관한 연구의 경우 연구자마다 내린 결론이 다르다는 한계가 있다. 이에 따라 기계적 체결 방법에서 체결과 동시에 드릴링에 의한 결함을 보수할 수 있는 재료와 공정을 설계한다면 기계적 체결 시 발생하는 문제점을 해결할 수 있을 것이다.

1.1.4 기계적 체결 문제 해결방안:

탄소 나노물질을 첨가한 탄소섬유강화 복합재료 체결 부품 개발
본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 기계적 체결 시 발생하는 문제를 해결하기 위해 다음의 해결방안을 제시하였다. 현재 자동차나 항공기 등에서 사용되는 기계적 체결 방식의 주요한 문제는 금속 체결 부품의 사용으로 인한 무게 증가, 수분 환경 노출 시 부식의 가능성, 체결 판재인 섬유강화 복합재료와의 이질성 등이 있다. 또한 볼트나 리벳 등의 체결 부품을 이용한 체결 시 드릴을 이용한 체결 구멍 가공이 필수적인데, 이는 박리를 포함한 다양한 결함을 야기하며 구성요소의 강도 저하, 피로 하중 하에서 성능저하, 부품의 불량 및 폐기를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 열가소성 탄소섬유강화 복합재료(Carbon fiber reinforced thermoplastics, CFRTP) 체결 부품 개발을 목표로하였다. CFRTP 체결 부품은 금속 체결 부품과 달리 일정 하중을 가하면 재료의 변형이 발생하는 것이 아닌 파괴가 발생하는 특징을 가지므로 열가소성 수지의 용융점(Melting temperature) 이상의 온도에서 체결이 진행된다.

이에 따라 CFRTP 체결 부품을 효과적으로 가열시키는 방법이 필요한데, 이때 사용하는 가열 방법은 유도가열(Induction heating)이다. 유도가열은 전자기 유도현상을 이용한 가열 방법으로 대류 또는 복사열 전달에 의존하는 기존 가열 방법에 비해 열효율이 우수하며, 단시간 내 균일한 가열이 가능한 국부적인 가열 방법이다[28-31]. 또한 가열물에 따라 주파수, 전력, 코일의 형상, 코일 내 가열물의 위치 등을 조절하여 가열 온도를 조절할 수 있는 특징이 있다[30, 32-34]. 유도가열 시 영향을 미치는 변수들을 표 1에 나타내었다. 유도가열이 효과적으로 이루어지기 위해서 재료의 전기전도 특성이 높아야 한다. 이때 재료의 전기전도도 및 인성을 높이기 위한 방법으로 탄소 나노물질을 첨가하는

방법이 있다. 그래핀(Graphene), 그래핀 나노판(Graphene nano platelets, GNPs), 카본블랙(Carbon black, CB), 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT) 등과 같은 탄소 나노물질은 고분자 기지재와 혼합 시 기계적 및 광학적 특성과 같은 중요한 기능을 손상하지 않고 고분자의 전도성 경로를 형성하면서 전기전도도를 향상시킬 수 있다[4, 9, 35-38]. 이때 전도성 경로를 효과적으로 형성하기 위해 탄소 나노물질은 고분자 기지재에 응집 없이 적절히 분산되어야 하며, 나노물질-고분자 또는 나노물질-나노물질 계면에서 전기저항이 최소화되어야 한다[36].

Pokharel et al.[36]은 탄소 나노물질을 함량별로 첨가한 복합재료를 제작하여 인장강도(Tensile strength), 영률(Young's modulus) 및 표면 전기저항(Surface resistivity)을 비교하였다. 첨가한 나노물질은 MWCNT, CB 및 GNP와 세 가지 나노물질을 혼합한 것으로, 테트라하이드로퓨란(Tetrahydrofuran) 용매에 나노 물질을 분산시켜 복합재료를 제작하였다. 나노물질을 첨가한 복합재료의 물성 및 성능을 측정된 결과, 탄소 나노물질 첨가 시 표면 전기저항이 감소함에 따라 전기전도 특성이 증가하고, 인장강도 및 영률의 기계적 특성이 증가하였다. 특히 탄소 나노물질을 단일로 첨가할 시, MWCNT가 CB, GNP보다 특성이 우수하였다. 탄소 나노물질 첨가에 따른 전기적 및 기계적 특성 결과값을 표 2에 나타내었다.

Nassar et al.[39]는 연속된 섬유로 제작된 복합재료와 무작위의 짧은 섬유로 제작된 복합재료의 GNP 함량에 따른 기계적 특성을 비교하였다. 실험을 통해 무작위의 짧은 섬유에 비해 연속 섬유로 이루어진 복합재료의 기계적 특성이 우수함을 입증하였다. 또한 연속섬유강화 복합재료에 GNP를 0.1, 0.3, 0.4, 0.5 wt% 첨가 시 충격강도가 25.8, 26.7, 30.7, 28.7% 향상되었으며 GNP 0.5 wt% 첨가

시 인장강도가 78% 향상되었다. 이를 통해 탄소 나노물질 첨가 시 복합재료의 기계적 특성이 향상됨을 입증하였다.

복합재료의 기계적 특성 및 에너지 흡수 능력은 구성 요소의 특성과 섬유, 수지 및 나노물질 사이의 결합 강도에 따라 달라진다[40, 41]. 무작위의 짧은 섬유는 연속 섬유에 비해 섬유와 수지 간의 결합이 약해 균열 전파가 쉬워져 흡수 에너지가 낮은 반면, 연속 섬유는 섬유와 수지 간 결합이 강하고 균일한 분포를 나타내어 하중 분산에 유리하며[42] 한 지점에서 다른 지점으로의 응력 전달을 방해하는 역할을 하고, 저장 탄성계수가 높아 고분자 사슬의 이동이 감소시키기 때문에 재료의 기계적 특성이 우수하다[43, 44]. 또한 탄소섬유강화 복합재료 제조 시 탄소 나노물질이 첨가되어 적절히 분산되어 있으면 복합재료 내 전기전도성 경로가 형성되며 외부로부터 가해지는 힘이 섬유로 쉽게 전달되어 재료의 전기적 및 기계적 특성이 증가한다[45]. 따라서 CFRTP 체결 부품 제작 시 연속된 탄소섬유와 탄소 나노물질을 사용하여 전기적 및 기계적 특성을 향상하도록 한다.

본 연구에서는 CFRTP 체결 부품 제작 시 MWCNT 탄소 나노물질을 첨가하여 제품의 전기전도 및 기계적 특성을 높여 유도가열 효과 및 물성을 향상한다. 제작한 CFRTP 체결 부품을 유도가열하여 수지의 용융점 이상의 온도 도달 후 하중을 가하여 수지의 주입, 유동, 압밀 및 냉각의 과정을 거쳐 체결을 진행한다. 이때 용융된 고분자 수지가 체결과 동시에 드릴링에 의한 결합 사이로 주입되어 보수될 수 있다. 이를 그림 3에 나타내었다.

표 1. 유도가열 효율에 영향을 미치는 매개변수. 출처: [46]

Parameter	Effect on heating	Remarks
Coil geometry	Dependent on magnetic flux density	Coil geometries should be designed to fit the heating problem
Magnetic flux concentrators	Application usually leads to higher heating rates	Danger of inhomogeneous heating due to locally higher magnetic flux
Coupling distance	The smaller the coupling distance the higher is the heating effect	Homogeneous heating sometimes requires less efficient coupling distance (danger of local overheating)
Frequency	A high frequency is generally better for the fast heating of composites	Very high values limit penetration, also dependent on size for particulate susceptors, high-frequency generators less efficient
Inductor current	A high current leads to more power in the system and thus a faster heating	Risk of local overheating (micro-level)

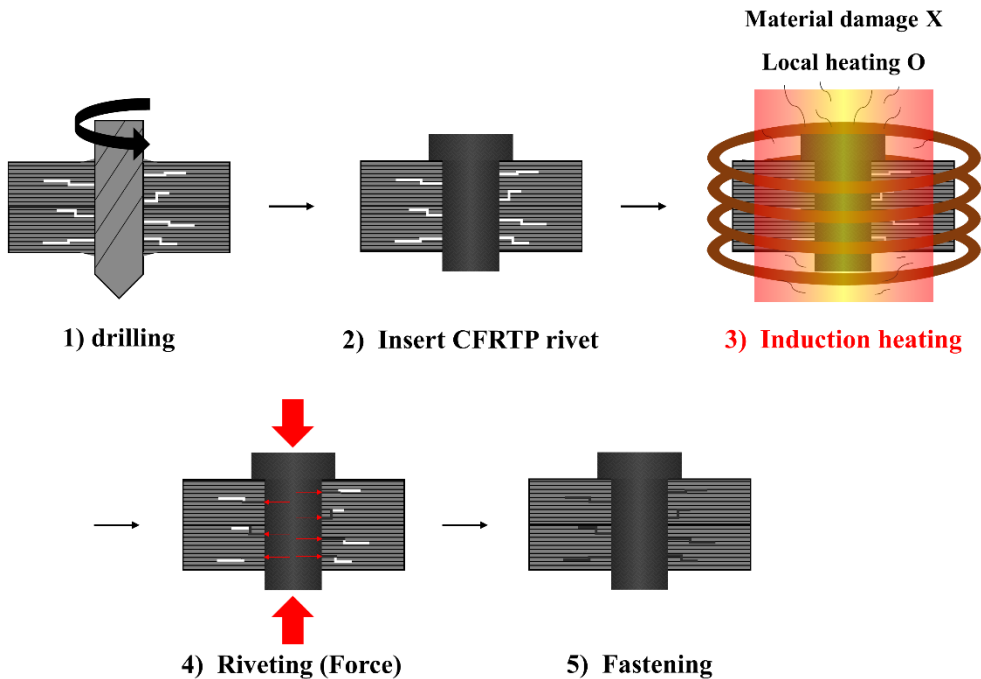


그림 3. CFRTP 체결 부품 체결 과정.

표 2. GNP, CB, MWCNT 기반 폴리우레탄 하이브리드

나노 복합재료의 전기적 및 기계적 특성 요약. 출처: [36]

Sample code	Filler (wt%)			Total filler Content (wt%)	Log surf. Resistivity (Ω/\square)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)
	GNP	CB	MW CNT				
PU0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5 ± 0.3	36.48	11.92
GNP-PU1	1.0	0.0	0.0	1.0	12.5 ± 0.4	32.56	18.25
GNP-PU2	2.0	0.0	0.0	2.0	11.5 ± 0.4	29.43	21.44
GNP-PU3	3.0	0.0	0.0	3.0	10.1 ± 0.5	18.83	25.16
GNP-PU5	5.0	0.0	0.0	5.0	10.0 ± 0.4	8.5	29.34
CB-PU1	0.0	1.0	0.0	1.0	12.3 ± 0.7	26.33	17.3
CB-PU2	0.0	2.0	0.0	2.0	11.9 ± 0.6	21.93	22.7
CB-PU3	0.0	3.0	0.0	3.0	9.3 ± 0.5	8.71	19.88
MWCNT-PU1	0.0	0.0	1.0	1.0	10.6 ± 0.3	40.3	19.09
MWCNT-PU2	0.0	0.0	2.0	2.0	8.6 ± 0.2	38.47	26.02
GNP-CB-PU2	1.0	1.0	0.0	2.0	11.2 ± 0.5	27.54	24.2
GNP-MWCNT-PU2	1.0	0.0	1.0	2.0	10.3 ± 0.3	34.7	26.8
GCM111-PU2	0.667	0.666	0.667	2.0	10.1 ± 0.3	30.4	28.6
GCM112-PU2	0.5	0.5	1.0	2.0	6.9 ± 0.2	39.26	35.45
GCM113-PU2	0.4	0.4	1.2	2.0	6.7 ± 0.2	37.21	38.02
GCM211-PU2	1.0	0.5	0.5	2.0	10.7 ± 0.5	32.4	31
GCM121-PU2	0.5	1.0	0.5	2.0	11.1 ± 0.4	28.1	24.3

1.1.5 탄소섬유강화 복합재료 유도가열 메커니즘

본 연구에서는 금속 체결 부품을 대체할 CFRTP 체결 부품을 개발하여 경량성, 고강도, 고강성의 특징을 가지면서 드릴링에 의한 결함 보수를 목표하였다. CFRTP 체결 부품은 고분자 수지의 용융점 이상의 온도로 체결 부품을 가열한 후 수지의 유동, 압밀 및 냉각에 의한 체결을 진행되어야 한다[28]. 이때 탄소섬유강화 복합재료를 가열시킬 수 있는 다양한 방법이 존재하는데, 그중 효과적인 가열 방법은 유도가열이다. 유도가열은 전자기 유도현상을 이용한 가열 방법으로 대류 또는 복사열 전달에 의존하는 기존 가열법에 비해 열효율이 우수하며, 단시간 내 균일한 가열이 가능한 국부적인 가열 방법이다[28-31]. 유도가열 메커니즘은 그림 4와 같이 와전류 손실과 히스테리시스 손실로 이루어진다[7, 29, 30, 32-34, 46]. 와전류 손실은 줄 열에 의한 에너지 손실을 말한다. 교류 전원에 연결된 코일에 전류가 흐르면 코일 내부와 주위에 자기장이 형성된다. 이때 식 (1)의 패러데이 법칙에 따라 자속(Φ_B)을 갖는 교류 전자기장의 크기가 시간에 따라 변화하면 코일 내부의 전도성 재료에 전압(U)이 유도된다. 유도된 전압은 코일에 흐르는 반대 방향으로 와전류(I)를 발생시키며, 발생된 와전류는 줄의 법칙에 따라 식 (2)만큼의 가열 전력이 줄 열로 변화되어 재료를 가열시킨다. 이를 그림 4의 (a)에 나타내었다.

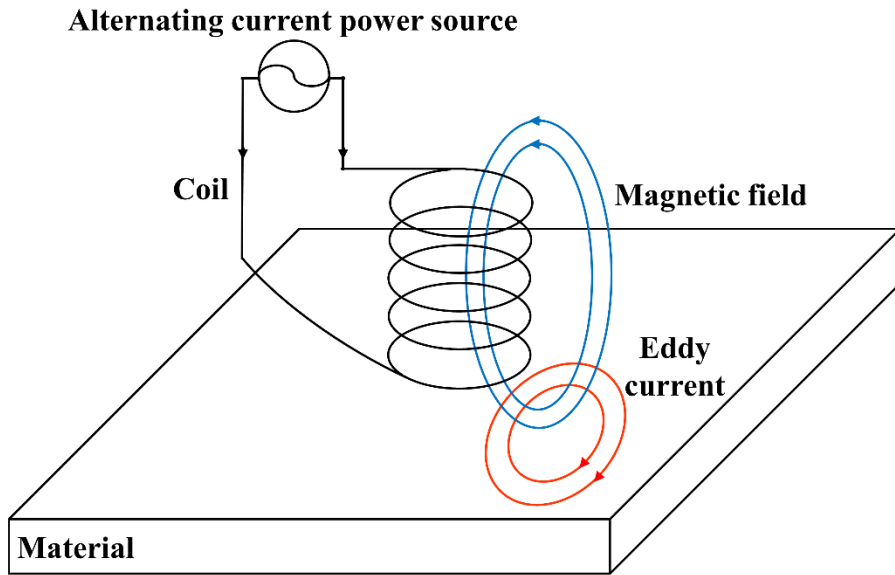
$$U = emf = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

$$P = I^2 \times R \quad (2)$$

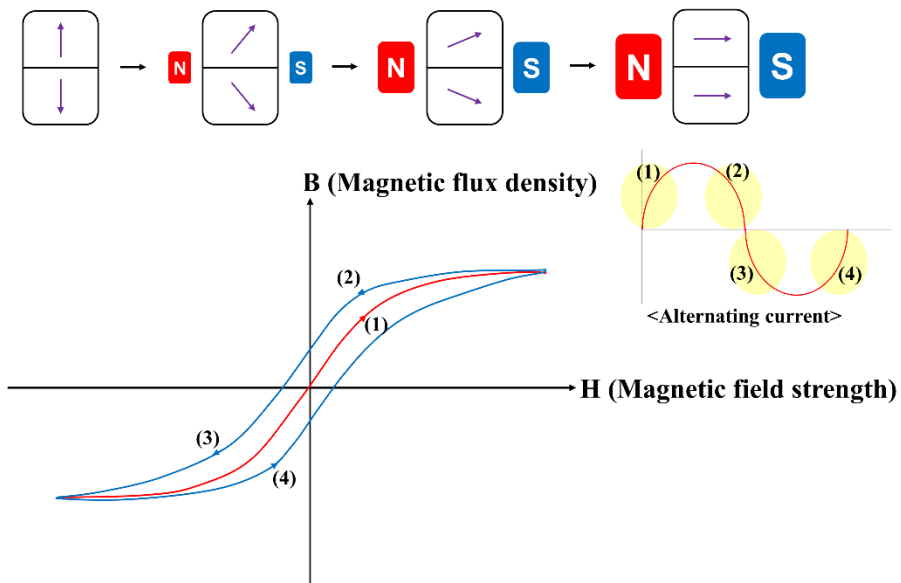
히스테리시스 손실은 재료에 작용하는 교류 자계로 인해 재료 내부의 자기 성분들이 회전하면서 생하는 진동과 마찰로 인한 손실을 말한다. 초기 자성 재료의 내부 자기 쌍극자의 힘은 0이다. 이때 자기장의 세기가 증가함에 따라 내부 자기 쌍극자는 회전하게 되고, 일정 이상의 자기장 세기에 도달하면 자기 쌍극자의 값이 최대가 되어 포화상태에 도달한다. 이 과정에서 자기 쌍극자들의 마찰에 의한 히스테리시스 손실이 발생하게 되는데, 교류 전류는 사인파(Sine) 거동을 띄며 증가·감소를 반복하므로 자화 특성곡선의 자계 역시 증가·감소를 반복한다. 결과적으로 그림 4의 (b)와 같이 파란색의 곡선을 띄게 되고, 내부 면적만큼의 히스테리시스 손실의 열이 발생하게 된다. 히스테리시스 손실은 와전류 손실로 인한 영향보다 작으며, 자성 재료가 상자성 상태로 변하는 큐리 온도 이전까지만 적용된다. 와전류 손실과 히스테리시스 손실에 관한 요소들을 표 3에 나타내었다.

표 3. 유도가열 메커니즘 및 관련 요소. 출처: [46]

	Eddy currents	Magnetic hysteresis
Preconditions for induction heating	Closed electrically conductive loop	Ferromagnetic properties of the susceptor
Mechanism	Induced current, electric field polarity reversal	Magnetization reversal
Heat generation	Resistive heating (Joule losses) and dielectric heating	Friction losses
Limitations	Penetration depth	Curie temperature
Side effects	Density increase due to susceptors	
Exemplary susceptors	Carbon fiber fabric, metal grids, metal coated fibers	Particles of iron, nickel, or cobalt alloys



(a)



(b)

그림 4. 유도가열 메커니즘. (a) 와전류 손실, (b) 히스테리시스 손실.

탄소섬유강화 복합재료에 적용되는 유도가열 메커니즘은 다음과 같다. 탄소섬유강화 복합재료의 기지재인 순수한 고분자는 단독으로 존재 시 유도가열이 불가능하므로 전기전도가 가능한 탄소섬유에서 전자기 에너지가 열로 변화되어 가열이 이루어진다[29, 32]. 가열은 그림 5와 같이 탄소섬유강화 복합재료에 존재하는 전도성 경로를 따라 이루어진다. 이때 와전류 발생의 전제조건은 탄소섬유 간 접촉으로 인해 단혀있는 전기전도 경로의 존재이다[7, 22, 28, 29, 31, 34, 46]. Miller et al.[47]는 탄소섬유의 배향이 단방향인 적층판의 경우 전기전도 경로가 열려 있어 와전류가 생성되지 않아 유도가열이 이루어지지 않으며, 탄소섬유의 배향이 수평과 수직으로 교차하는 적층판의 경우 전기전도 경로가 단혀 있으므로 와전류가 생성되어 유도가열이 가능함을 확인하였다. 이를 통해 유도가열 영역이 탄소섬유의 배향에 의해 만들어진 폐쇄된 전기전도성 경로를 따라 탄소섬유 내부에서 줄 열이 발생하여 가열이 이루어짐을 입증하였다. Fink et al.[48]는 탄소섬유 사이 접촉이나 근접이 없다고 가정을 하고, 열 발생은 섬유 사이 고분자의 유전 손실에 의해 발생한다고 입증하였다. 앞선 연구를 통해 탄소섬유강화 복합재료의 유도가열은 탄소섬유 내부에서 발생하는 줄 열과 섬유 간 접합부에서 발생하는 유전자열과 접촉저항으로 설명할 수 있다[7, 28, 29, 34, 46, 49]. 섬유 내 줄 열은 유도된 와전류가 전도성 섬유를 따라 흐를 때 섬유의 전기 저항(R_f)에 의한 열이 생성되어 줄 손실이 발생한다. 섬유 내 전기 저항은 섬유 재료의 저항률(ρ_f), 섬유를 통과하는 전도성 경로의 길이(l_f), 단면적(A_f)에 의해 결정되며 식 (3)과 같다. 섬유 간 접합부의 접촉 저항(R_{jc})에 의한 발열은 탄소섬유 간 물리적으로 접촉하는 교차점에서 발생한다. 접촉 저항은 섬유 간 접촉하고 있는 면적(A_c)과 저항률(ρ_c)에 따라 달라지며 식 (4)와 같다. 이때 접촉 면적은 접촉 영역의 압력에 의해 영향을 받으므로 섬유의

종류 및 부피 함량에 따라 달라진다. 섬유 간 접합부의 유전가열은 얇은 고분자 층이 섬유를 분리하여 물리적 접촉이 없는 상태일 때 고분자 수지에서 발열이 발생한다. 이 경우, 고분자에 의해 분리된 섬유 사이의 전압 차는 섬유 간 전기장을 유발하고 고분자는 유전체로 작용한다. 이때 전자기장에 따른 분극에 의하여 탄소섬유 사이의 고분자에서 분자들의 마찰 손실이 열로 변화되는 유전 손실이 발생한다. 유전가열은 저항(R_{jd})과 병렬로 연결된 커패시터로 구성된 등가 회로로 나타낼 수 있다. 이를 식 (5)에 나타냈으며, l_f 는 섬유 사이 고분자의 두께, f 는 전자기장의 주파수, A_c 는 대전 된 영역, ϵ_0 는 진공 유전율, ϵ_r 은 상대 유전율, $\tan \delta$ 는 고분자의 손실 계수를 의미한다[31].

$$R_f = \rho_f \frac{l_f}{A_f} \quad (3)$$

$$R_{jc} = \frac{\rho_c}{A_c} \quad (4)$$

$$R_{jd} = \frac{l}{2\pi f A_c \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta} \quad (5)$$

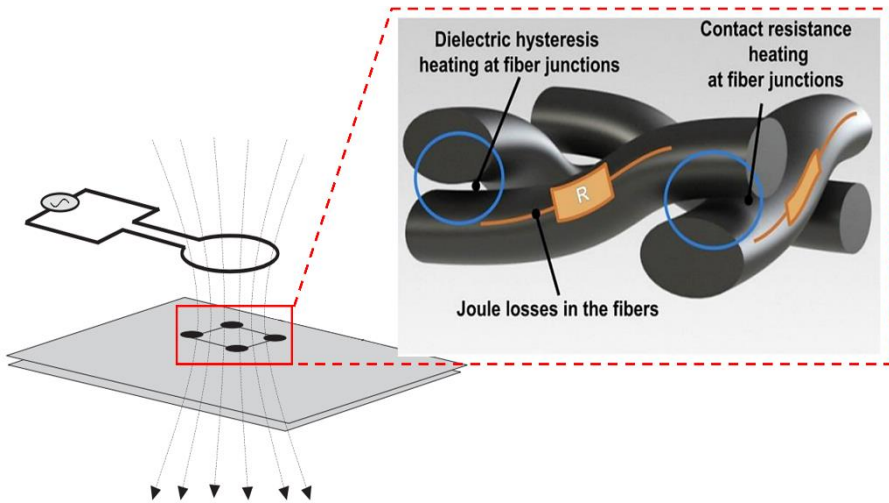


그림 5. 탄소섬유강화 복합재료 유도가열 메커니즘. 출처: [49, 50]

현재 탄소섬유강화 복합재료의 유도가열은 높은 효율로 단시간 내 국부적인 위치를 균일하게 가열시킬 수 있다는 장점으로 접합 이외에도 미세 충격손상 회복, 금형 가열, 복합재료 경화 등 다양하게 적용되고 있다[46, 51-53].

1.1.6 연구의 목표

본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 기계적 체결 시 발생하는 다양한 문제점을 해결하기 위해 CFRTP 체결 부품 개발을 목표로하였다. CFRTP 체결 부품은 유도가열 방법을 통해 수지의 용융점 이상 온도로 가열 후 체결되며, 체결과 동시에 드릴링에 의한 결함 사이로 용융된 수지가 주입되어 박리 보수를 진행한다. 이때 CFRTP 체결 부품의 전기전도 특성이 높여 유도가열이 효과적이며, 기존의 체결 부품에 비해 가볍고 고강도의 특성을 갖도록 목표로하였다.

제 2 절 연구의 내용

1.2.1 유도가열 및 물성 향상을 위한 조건 설정

본 연구는 섬유강화 복합재료의 기계적 체결 시 발생하는 문제점을 해결하기 위해 체결 부품인 CFRTP 리벳 개발을 목표로하였다. CFRTP 리벳은 금속 리벳과 달리 일정 하중을 가하면 파괴되므로 고분자 수지의 용융점 이상의 온도로 가열 후 용융된 수지의 유동에 의한 체결이 이루어진다. 이에 따라 CFRTP 리벳의 물성과 유도가열 효과를 높일 수 있는 재료와 구조를 설계하여 제품을 개발하여야 한다.

CFRTP 리벳 제작에 앞서 강화재인 탄소섬유의 형태 및 함량, 첨가제의 함량에 따른 제품의 물성과 성능을 평가할 것이다. 성능 평가를 위해 탄소섬유와 PA6(Polyamide6)를 이용하여 CFRTP 시편을 제작한다. 이때 기계적 및 전기적 특성을 향상시키기 위해 MWCNT를 함량별로 첨가한다. 시편 제작 시 핫프레스 장비를 이용하여 PA6의 용융점 이상 온도로 열을 가하면서 5 MPa의 압력으로 20분간 압밀을 진행한다. 이후 가열 가압 된 시편을 PA6의 유리 전이온도 이하의 온도로 수냉시킨다. 이후 제작된 시편을 유도가열 경향 측정을 위한 크기로 가공하여 고주파수 조건하에서 유도가열 경향을 확인한다.

CFRTP의 MWCNT 함량에 따른 전기전도도 측정을 위해 멀티미터(Multimeter)를 이용하여 4 탐지법(4 point probe)으로 시편의 저항을 측정한다. 저항 측정 시 시편을 $12.7 \times 12.7 \times 3.5 \text{ mm}^3$ 의 규격으로 가공하고, 시편의 양 끝 면에 도전성 실버 페이스트를 도포한 후 구리선을 부착하여 측정한다. 측정한 시편의 저항을 시편의 단면적과 길이에 따른 비저항으로 나타낸 후, 이를 역수 취해 전기전도도로 나타낸다.

CFRTP의 MWCNT 함량에 따른 충격강도(Izod impact strength)를 측정하기 위해 ASTM D256에 따라 아이조드 충격 시험(Izod impact test)을 진행한다. ASTM 규격에 따라 시편을 $12.7 \times 63.5 \times 3.5 \text{ mm}^3$ 의 규격으로 가공한다. 이때 2.54 mm의 깊이, 45° 각도의 V자형 노치를 가공하기 위해 곡률 반경 0.25 mm의 커팅기가 장착된 노치가공기계를 사용한다. 제작한 아이조드 시편을 팬들럼 충격 시험기에 위치시킨 후 충격을 가하여 충격강도를 측정한다.

1.2.2 CFRTP 리벳 및 체결 판재 제작

탄소섬유의 형태 및 함량, MWCNT 함량에 따른 유도가열, 전기전도도, 충격강도 평가를 진행한 결과에 따라 가장 최적의 성능을 갖는 조건을 바탕으로 CFRTP 리벳을 제작한다. 이때 MWCNT를 적절히 분산하기 위해 이축 스크류 압출기를 이용한다. PA6, MWCNT를 이축 스크류 압출기에 넣은 후 260°C 의 온도, 70 rpm의 회전 속도로 10분간 분산시켜 압출한다. MWCNT가 분산된 PA6와 탄소섬유를 섬유의 부피분율이 60%가 되도록 적층을 한 후 1차 프레스 하여 CFRTP 판재를 제작한다. 제작한 CFRTP 판재를 리벳 1개 부피에 맞는 크기로 가공 후, 리벳 모양의 금형 몰드를 이용하여 CFRTP 리벳을 제작한다.

다음으로 제작한 CFRTP 리벳의 물성 평가를 위해 체결 판재를 제작한다. 이때 리벳으로 체결할 섬유강화 복합재료 적층판은 항공기를 재현하기 위해 탄소섬유에 PA6가 함침된 단방향 연속 섬유강화 테이프를 준등방성 구조(Quasi-isotropic structure)로 적층한다. 이때 0° 방향은 축 하중, 45° 방향은 전단 하중, 90° 방향은 측면 하중에 반응되도록 설계한다[1, 18]. 준등방성 구조로 적층한 섬유강화 복합재료 적층판은 오토클레이브(Autoclave) 성형 방법을 통해

제작된다. 이때 공정 조건은 진공 조건하에서 7 bar의 압력, 5°C/min의 승온 속도로 260°C까지 온도를 올린 후 30분간 압력과 온도를 유지하여 제작한다. 이후 제작한 섬유강화 복합재료 적층판을 물성 평가에 맞는 규격으로 가공한다. 이때 체결 구멍은 드릴링 장비를 이용하여 직경 6 mm로 가공한다.

1.2.3 유도가열을 통한 CFRTP 리벳 체결

유도가열의 주요한 매개변수는 주파수, 전력, 코일의 형상, 코일 내 가열물의 위치이다. 매개변수에 따라 유도가열의 효과가 달라지기 때문에 가열할 재료에 맞는 유도가열 매개변수를 설정할 필요가 있다. 일반적으로 유도가열에 사용하는 주파수는 50/60~450 kHz의 범위로 저주파수의 경우 침투 깊이가 깊은 반면, 고주파수는 표피효과(Skin effect)로 인해 침투 깊이가 얇다. 하지만 주파수가 증가함에 따라 와전류의 영향이 커지므로 주파수가 높아질수록 유도가열에 효과적이다. 또한 코일에 흘려주는 전류가 높을수록 코일과의 거리가 가까울수록 유도가열에 효과적이다.

제작한 CFRTP 리벳의 체결을 진행하기 전, 리벳의 유도가열을 진행하여 가열 경향을 관찰할 것이다. 가열 온도를 측정하기 위해 리벳의 중앙 몸통 부분에 구멍을 가공하여 열전대(Thermocouple)를 삽입 후 215~220 kHz의 주파수에서 전력을 변화시켜 90초 동안 가열한다. 이후 효과적인 온도 증가를 보여준 가열 조건을 바탕으로 CFRTP 리벳의 유도가열을 통한 체결을 진행한다. 이때 목표 가열 온도는 PA6 수지가 충분히 용융되어 흐름성을 갖도록 250°C 이상 온도로 설정한다. 유도가열을 통해 용융점 이상의 온도에 도달된 CFRTP 리벳을 리벳의 머리(Head)와 벡테일(Buck-tail)의 형상에 맞는 금형에 위치시킨 후 하중을 가하여 체결을 진행한다.

1.2.4 분석

제작한 CFRTP 리벳의 탄소섬유 배향과 연속성, MWCNT의 분산성, 내부구조 분석을 위한 관측을 진행한다. 디지털 현미경(Digital microscope), 3차원 X-ray 현미경(3D X-ray microscope, XRM)을 통해 탄소섬유의 배향과 연속성을 관측한다. 또한 CFRTP 리벳의 체결을 통한 박리 보수 및 내부 구조를 관측하기 위해 X선 컴퓨터 단층촬영 장치(X-ray Micro-Computed Tomography, Micro-CT)을 이용해 내부 분석을 진행한다.

1.2.5 기계적 물성 평가

CFRTP 리벳의 기계적 강도를 평가하기 위해 단일 중첩 전단시험(Single lap-shear test)과 굽힘시험(Bending test)을 진행할 것이다. 각각의 물성 평가를 통해 베어링강도(Bearing strength)와 굴곡강도(Flexural strength)를 평가한다.

단일 중첩 전단시험은 ASTM D5961에 따라 진행하며, 시편 규격은 $36 \times 135 \times 3.1 \text{ mm}^3$ 으로 설계한다. 2개의 시편을 $36 \times 36 \text{ mm}^2$ 넓이만큼 중첩한 후 체결 부품으로 고정한다. 이때 시편의 수평을 맞추기 위해 양 끝 45 mm에 Grip tab을 부착이 필요하므로 유리섬유강화 복합재료(Glass fiber reinforced plastic, GFRP)를 $36 \times 45 \times 3 \text{ mm}^3$ 규격으로 준비한다. Grip tab은 에폭시 접착제인 DP460을 이용하여 부착한다. 시험은 250 kN 로드셀이 장착된 Instron의 고하중 만능 시험기를 이용하며, 1 mm/min의 속도로 진행한다.

굽힘시험은 ASTM D790에 따라 진행하며, 시편 규격은 2개의 시편을 중첩한 두께 기준인 $24.8 \times 119.04 \times 6.2 \text{ mm}^3$ 으로 설계한다. 시험 시 지지 스패의 넓이는 측정 시편 두께의 16배인 99.2 mm으로 설정하며 리벳 사이 거리는 리벳 직경의 6배로 설정한다. 시험은

3000 kgf 로드셀이 장착된 Salt의 고하중 만능 시험기를 이용하여 2.6 mm/min의 속도로 진행한다. 이때 시험 속도는 지지 스펀의 넓이와 시편의 두께에 고려하여 설정한다.

제 2 장 실 험

제 1 절 CFRTP 리벳 제작

2.1.1 유도가열 및 물성 향상을 위한 조건 설정

CFRTP 리벳은 탄소섬유, PA6, MWCNT로 제작한다. 강화재인 탄소섬유는 강도 대 중량비가 우수하며 내열성, 낮은 열팽창률, 화학적 안정성, 내크리프성 등 우수하다. 기지재인 PA6는 기계적, 열적 특성이 우수하며 PEEK(Polyether ether ketone), PPS(Polyphenylene sulfide)와 같은 슈퍼 엔지니어링 플라스틱에 비해 용융점과 점도가 낮아 성형성이 우수하다. 탄소 나노물질인 MWCNT는 CB, Graphene, GNP에 비해 중량비가 높아 하중 전달에 유리하여 인장강도, 파괴인성, 탄성률과 같은 기계적 및 전기적 특성이 우수하다[36]. CFRTP 리벳 제작 시 탄소섬유의 형태 및 함량, 첨가제의 함량 등에 따라 제품의 유도가열 효과와 물성 등이 달라지므로 위의 변수를 조절하여 성능 평가를 진행하였다.

탄소섬유의 형태와 MWCNT의 함량에 따른 유도가열 경향을 확인하였다. 첫 번째 유도가열 조건은 PA6 기준, MWCNT를 1 wt% 첨가하였고, 각각 직물 탄소섬유, 무작위의 짧은 탄소섬유, 철가루로 구성된 시편을 제작하였다. 제작한 시편을 $15 \times 150 \times 1.5 \text{ mm}^3$ 의 규격으로 가공하여 직경 33 mm의 3회전 솔레노이드 코일 정중앙에 위치시킨 후 273 kHz의 주파수, 4.1 kW의 전력으로 60초 동안 가열하였다. 이때 탄소섬유와 철가루의 부피분율은 7, 1.5%이었다.

두 번째 유도가열 조건은 PA6 기준, MWCNT를 0, 1, 3 wt%

첨가하였고, 각각 직물 탄소섬유, 무작위의 짧은 탄소섬유로 구성된 시편을 제작하였다. 제작한 시편을 $15 \times 150 \times 1.5 \text{ mm}^3$ 규격으로 가공하여 직경 33 mm의 4회전 솔레노이드 코일 정중앙에 위치시킨 후 403 kHz의 주파수, 6.3 kW의 전력으로 60초 동안 유도 가열하였다. 이때 직물 탄소섬유와 짧은 탄소섬유의 부피분율은 50, 15%이었다. 각 유도가열 조건을 표 4에 요약하였으며, 유도가열 시 고주파 유도가열기(EASYHEAT 8310 & Standard HS, Ambrell, USA)를 사용하였다.

표 4. 유도가열 조건

	Reinforcement	Vol. fraction (%)	CNT content (wt%)	Heating conditions			
				Frequency (kHz)	Power (kW)	Time (s)	Coil turn
1st test	Carbon fiber fabric	7	1	273	4.1	60	3
	Short carbon fiber	7					
	Iron powder	1.5					
2nd test	Carbon fiber fabric	50	0	403	6.3	60	4
			1				
			3				
	Short carbon fiber	15	0				
			1				
			3				

다음으로 MWCNT 함량에 따른 전기전도도를 측정하기 위해 PA6 기준, MWCNT를 0, 1, 2, 3, 4 wt% 첨가하여 탄소섬유의 부피분율이 50%가 되도록 시편을 제작하였다. 전기전도도 측정을 위해 제작된 시편을 $12.7 \times 12.7 \times 3.5 \text{ mm}^3$ 의 규격으로 가공하고, 시편의 양 끝 면에 도전성 실버 페이스트를 도포한 후 구리선을 부착하여 4 탐지법으로 시편의 저항(R)을 측정하였다. 저항 측정 시 디지털 멀티미터(2000, Keithley, USA)를 사용하였으며, 식 (6)을 이용하여 시편의 단면적(A)과 길이(L)에 따른 비저항(ρ)을 구한 후, 식 (7)에 따라 전기전도도(σ)로 변환하였다. 시편의 저항 측정 과정을 그림 6에 나타내었다.

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (\Omega m) \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (S/m) \quad (7)$$

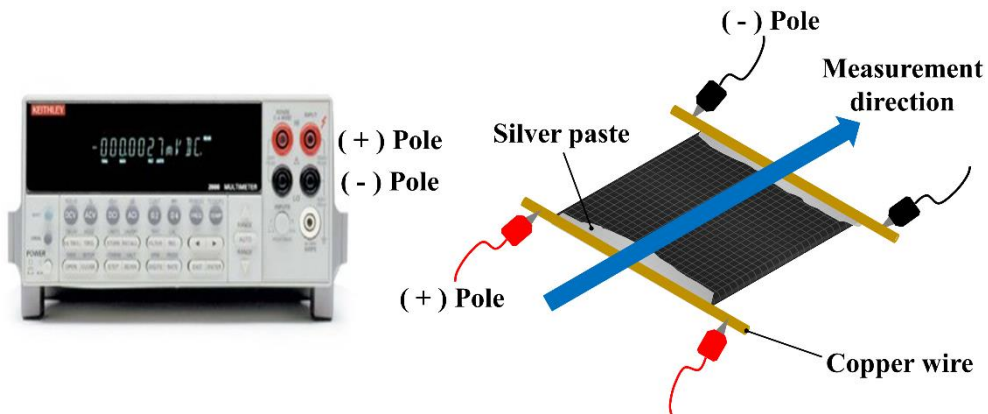


그림 6. 시편 저항 측정.

MWCNT 함량에 따른 충격강도를 측정하기 위해 PA6 기준, MWCNT를 0, 1, 2, 3, 4 wt% 첨가하여 탄소섬유의 부피분율이 50%가 되도록 시편을 제작하였다. 제작한 시편을 ASTM D256에 따라 $12.7 \times 63.5 \times 3.5 \text{ mm}^3$ 의 규격으로 가공하였다. 이때 곡률 반경 0.25 mm의 커팅기가 장착된 노치 생성 기계(899 Specimen Notcher, Tinius Olsen, UK)를 이용하여 2.54 mm 깊이, 45° 각도의 V자형 노치를 가공하였다. 제작한 아이조드 시편을 팬들럼 충격 시험기 (IT 503, Tinius Olsen, UK)에 위치시킨 후 충격을 가하여 충격강도를 측정하였다. 이때 사용한 팬들럼과 추의 무게는 1.889 kg으로 11.277 J의 에너지 충격을 가하였다. 시편의 충격강도 측정 과정을 그림 7에 나타내었다.

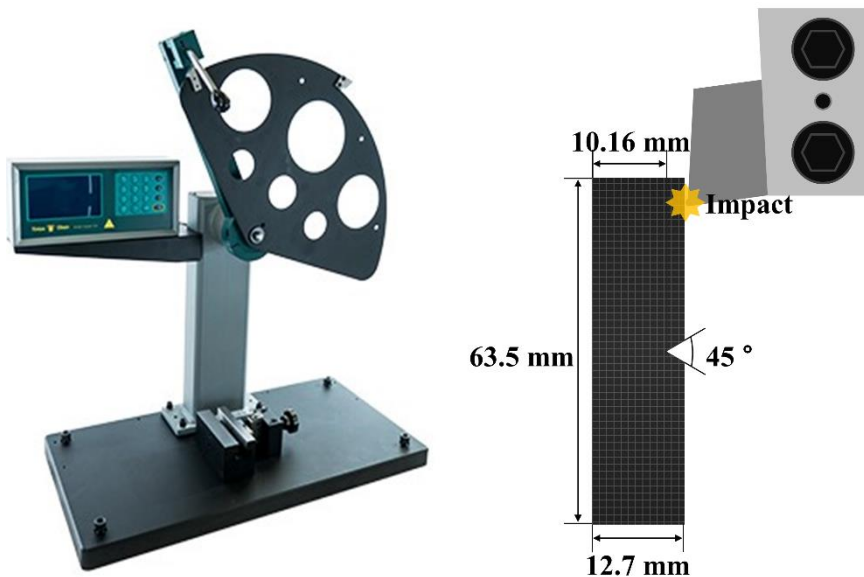


그림 7. 아이조드 충격 시험.

2.1.2 CFRTP 리벳 및 체결 판재 제작

탄소섬유와 MWCNT의 형태 및 함량에 따른 성능 및 물성평가를 진행한 결과, 최적의 성능을 갖는 조건을 바탕으로 CFRTP 리벳을 제작하였다. 탄소섬유는 도레이사의 평직물(T-300, Toray, Japan), 고분자 수지는 PA6(EN-200, KP Chemtect, Korea), 탄소 나노물질은 MWCNT(MR-99, Carbon Nano material technology, Korea)를 사용하였다. 표 5에 재료의 물성을 나타내었다.

MWCNT를 효과적으로 분산하기 위해 이축 스크류 압출기(Haake rheomix OS lab mixer, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 PA6 기준, MWCNT를 2 wt% 첨가하여 260°C의 온도에서 70 rpm의 회전 속도로 10분간 분산시켜 압출하였다. 압출된 PA6/MWCNT를 분말 형태로 가공 후 탄소섬유 층 사이사이에 분산시켜 섬유 파괴분율이 60%가 되도록 적층하였다. 적층물은 가열프레스(ST-100, SALT, Korea)를 이용하여 240°C의 온도, 5 MPa 압력으로 1차 프레스 하여 CFRTP 판재를 제작하였다. 제작한 CFRTP 판재를 리벳 1개 부피에 맞는 크기로 가공 후 리벳 모양의 금형 몰드를 이용하여 240°C의 온도, 10 MPa 압력으로 2차 프레스 하여 CFRTP 리벳을 제작하였다. 그림 8에 CFRTP 리벳 제작 공정을 나타내었다.

다음으로 제작한 CFRTP 리벳의 물성 평가를 위한 체결 판재를 제작하였다. 이때 리벳으로 체결할 판재는 항공기를 재현하기 위해 탄소섬유에 PA6가 함침된 단방향 연속 섬유강화 테이프(TC910, Toray, Japan)를 준등방성 구조([0/-45/45/90]2s)로 적층하여 제작하였다. 적층된 섬유강화 테이프를 오토클레이브(AC-05508, Fibretech, UK)를 이용해 진공 조건 하에서 7 bar의 압력, 5°C/min의 승온 속도로 260°C까지 온도를 올린 후 30분간 압력과 온도를 유지하여 제작하였다.

표 5. CFRTP 리벳 제작 시 사용된 재료의 물성

Material	Model	Material property	Value
Fiber	Carbon fiber (T300)	Tensile strength (MPa)	3,530
		Tensile modulus (GPa)	230
		Strain (%)	1.5
		Density (g/cm ³)	1.76
		Filament diameter (μm)	7
Matrix	PA6 (EN-200)	Melting temperature (°C)	224
		Glass Transition temperature (°C)	60
		Moisture (%)	0.07 Max
		Density (g/cm ³)	1.14
		Wt. of 100 chips (g)	0.82 ± 10%
Filler	MWCNT (MR-99)	Length (um)	~ 10
		Aspect ratio	> 500
		Purity (wt%)	> 99
		Specific surface area analysis (m ² /g)	150 ~ 200
		Bulk density (g/cm ³)	0.02 ~ 0.04

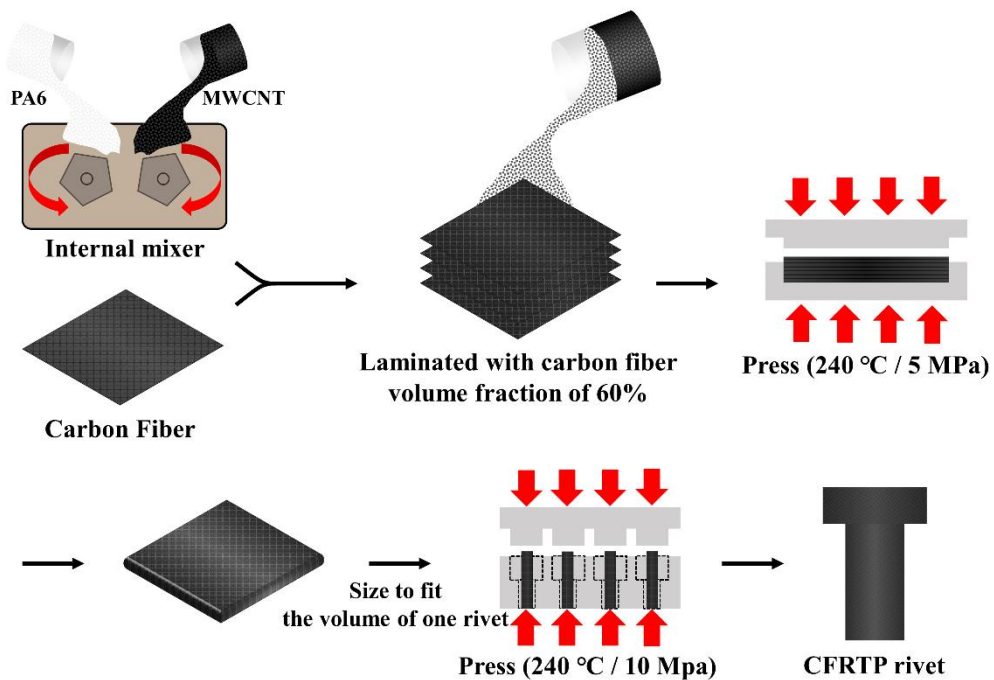
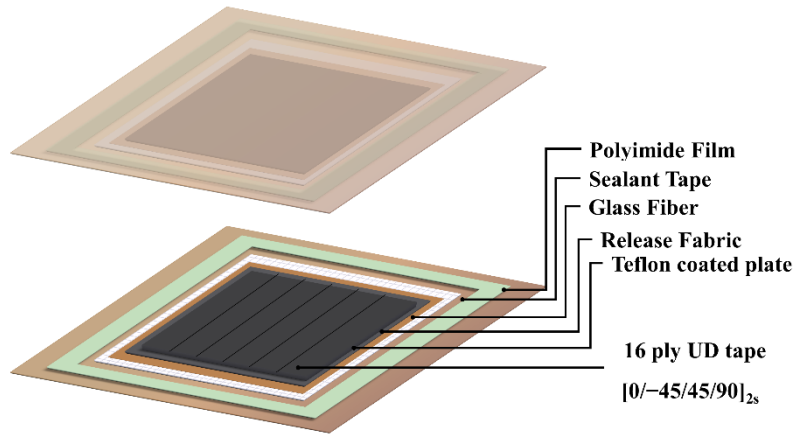
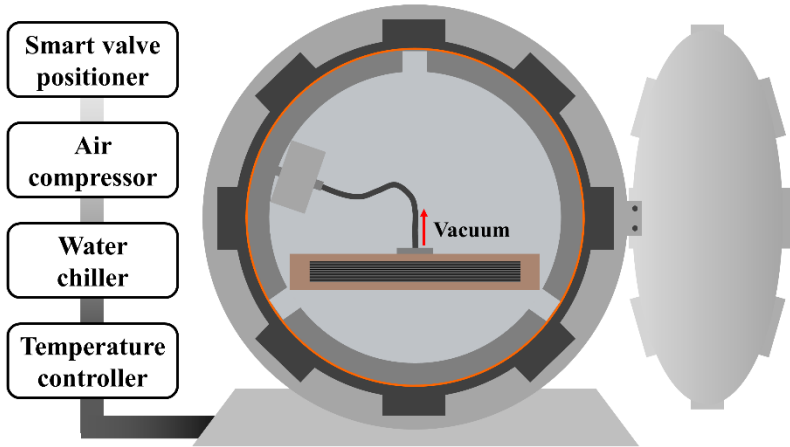


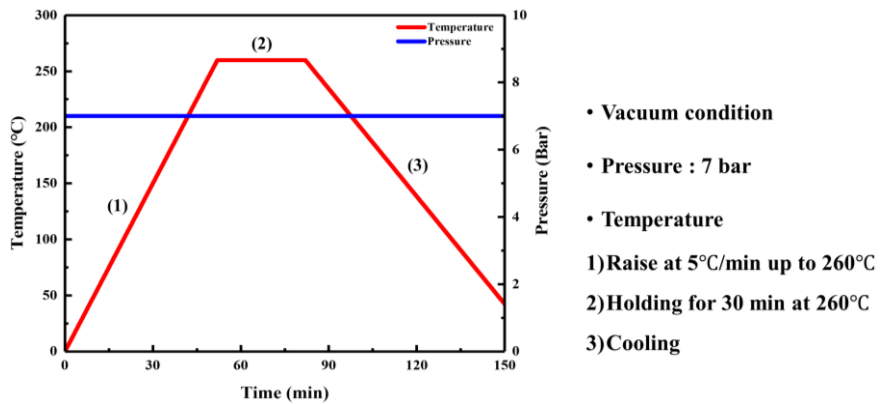
그림 8. CFRTP 리벳 제작 공정.



(a)



(b)



(c)

그림 9. 체결 판재 제작. (a) 탄소섬유강화 복합재료 적층판 모식도, (b) 오토클레이브 모식도, (c) 공정 조건.

제 2 절 CFRTP 리벳 유도가열 및 체결

CFRTP 리벳 체결 전, 유도가열에 따른 리벳의 온도 증가 경향을 확인하였다. 리벳의 중앙 몸통 부분에 구멍을 가공하여 열전대를 삽입 후 215~220 kHz의 주파수에서 전력을 변화시켜 90초 동안 가열하였다. 이때 단일 중첩 전단 시편은 55, 45 mm 가로/세로 직경, 40 mm 높이인 4회전의 타원형 코일을 사용하였으며, 굽힘 시편은 40 mm 직경, 65 mm 높이인 5회전 원통형 코일을 사용하였다. 이때 유도가열 시 발생하는 공진 주파수(Resonant frequency)는 코일의 인덕턴스(Inductance)와 고주파 가열기의 캐패시턴스(Capacitance)에 의해 계산된다. 코일의 인덕턴스(L)는 Wheeler's 공식 (8)에 의해 계산될 수 있으며, 코일의 직경(D), 높이(H), 감은 수(N)에 따라 변화한다. 고주파 가열기의 직렬 캐패시턴스(C)는 캐패시턴스의 용량과 개수에 따라 변화하며 식 (9)와 같다. 인덕턴스와 캐패시턴스에 따른 공진 주파수(F)는 식 (10)에 의해 계산될 수 있다[30].

$$L = \frac{N^2 \times D^2}{101.6 \times ((4.5 \times D) + (10 \times H))} \quad (\mu H) \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}\right)} \quad (\mu f) \quad (9)$$

$$F = \frac{1}{\sqrt{(L \times 10^{-6}) \times (C \times 10^{-6}) \times 2 \times 3.14}} \quad (Hz) \quad (10)$$

각 코일의 전력 변화에 따른 유도가열 결과, 효과적인 온도 증가를 보인 조건을 바탕으로 CFRTP 리벳을 체결하였다. 체결 판재의 체결 구멍에 CFRTP 리벳을 삽입 후 코일의 정중앙에 위치시켜 유도

가열하여 수지의 용융점 이상의 온도로 도달한 CFRTP 리벳을 리벳의 머리와 벽테일의 형상에 맞는 금형에 위치시킨 후 하중을 가하여 리벳팅을 진행하였다. CFRTP 리벳 체결 공정을 그림 11에 나타내었다.

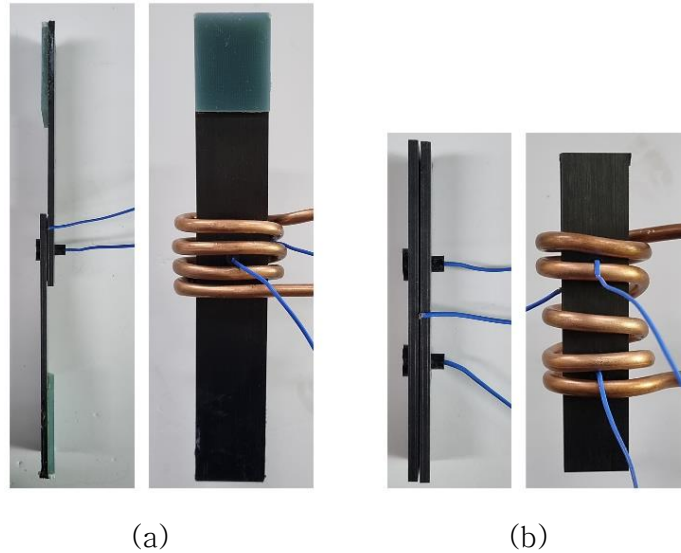


그림 10. 유도가열. (a) 단일 중첩 전단 시편, (b) 굽힘 시편.

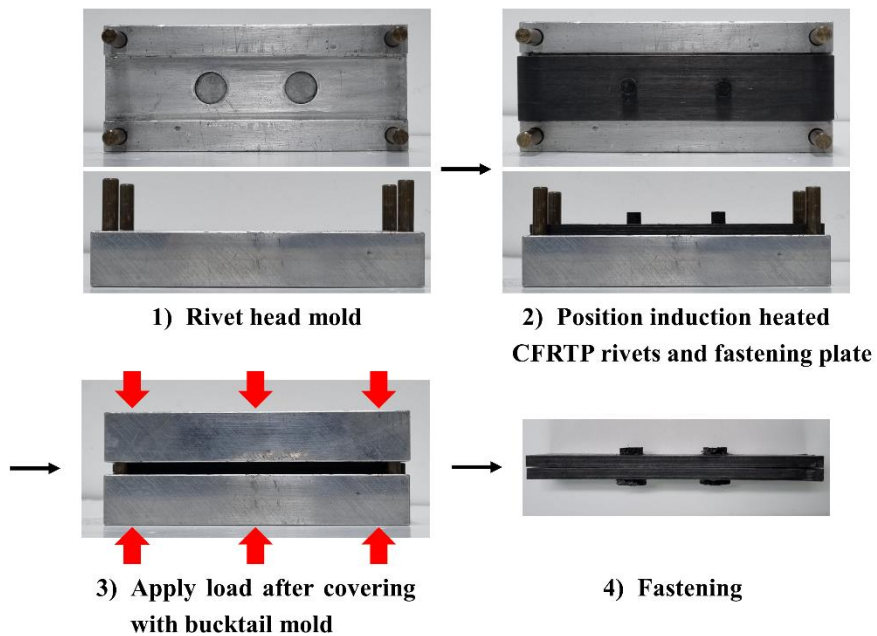


그림 11. CFRTP 리벳 체결 공정.

제 3 절 관찰

제작한 CFRTP 리벳의 탄소섬유 배향과 연속성, 탄소 나노물질의 분산성 및 내부구조 분석을 위한 관측을 진행하였다. 디지털 현미경(VHX-900F, Keyence, Japan)을 이용하여 제작한 리벳의 단면을 관측하였고, 3차원 X-ray 현미경(Zeiss: Xradia Ultra/Versa hybrid systems, Carl Zeiss X-ray Microscopy Inc, Germany)을 이용하여 탄소섬유의 배향 및 연속성, 내부 구조를 관측하였다. 이때 40 kV / 75 μ A 가속 전압, 2 μ m 픽셀의 측정 조건으로 관측하였다. 다음으로 CFRTP 리벳의 유도가열을 통한 체결 시 수지의 주입에 따른 박리 보수 관측하기 위해 X선 컴퓨터 단층촬영 장치(Skyscan1172, Bruker, US)를 이용하여 내부 구조 분석을 진행하였다. 이때 70 kV / 140 μ A 가속 전압, 4.48 μ m 픽셀 측정 조건으로 관측하였다. 또한 MWCNT의 함량별 분산 및 파단면을 관측하기 위해 주사전자현미경(Nova-nanoSEM 450, FEI, US)을 이용하여 아이조드 파단면을 관측하였다. 이때 17.5 kV 가속전압, 12.7 μ m 픽셀, 10,000 배율의 측정 조건으로 관측하였다.

제 4 절 기계적 물성 평가

2.4.1 단일 중첩 전단시험 (Single lap shear test)

CFRTP 리벳의 기계적 강도를 평가하기 위해 단일 중첩 전단시험을 진행하였다. 이때 체결 부품의 물성 비교를 위해 항공기에 사용되는 알루미늄 리벳의 평가도 진행하였다. 시편 규격은 ASTM D5961에 따라 $36 \times 135 \times 3.1 \text{ mm}^3$ 으로 설계했고, 2개의 시편을 $36 \times 36 \text{ mm}^2$ 넓이만큼 중첩한 후 리벳으로 고정하였다. 이때 체결을 위한 구멍은 드릴링 장비(HDM-13, Hando, China)와 6 mm 직경의 섬유강화 복합재료 전용 드릴 비트를 이용하여 가공하였다. 체결 후 시편의 수평을 맞추기 위해 양 끝 $36 \times 45 \text{ mm}^2$ 영역에 GFRP Grip tap을 에폭시 접착제(DP460, 3M, US)으로 부착하였다. 시험은 250 kN 로드셀이 장착된 고하중 만능 시험기(Instron 5985, Instron, US)를 이용하여, 1 mm/min의 속도로 진행하였다. 식 (11)을 통해 베어링 강도(F_{bru})를 계산하였으며[54], 이때의 P_{max} 는 최대 하중, K 는 구멍 계수(단일 중첩의 경우 1로 취급), D 는 체결 구멍의 직경, h 는 시편의 두께이다.

$$F_{bru} = \frac{P_{max}}{K \times D \times h} \quad (11)$$

2.4.2 3점 굽힘시험 (3 point bending test)

CFRTP 리벳의 기계적 강도를 평가하기 위해 3점 굽힘시험을 진행하였다. 이때 체결 부품의 물성 비교를 위해 항공기에 사용되는 알루미늄 리벳의 평가도 진행하였다. 시편 규격은 ASTM D790에 따라 $24.8 \times 119.04 \times 6.2 \text{ mm}^3$ 으로 설계했고, 2개의 시편을 중첩한 후 리벳으로 고정하였다. 시험은 3000 kgf 로드셀이 장착된 고하중 만능 시험기(ST-1002, SALT, Korea)를 이용하여 2.6 mm/min의 속도로 시험을 진행하였다. 이때 지지 스패의 넓이는 측정 시편 두께의 16배인 99.2 mm으로 설정하였다. 시험 속도(R)는 식 (12)에 따라 지지 스패의 넓이(L)와 시편의 두께(d)에 따라 설정하였으며 Z 는 상수로 0.01이다. 굴곡강도(σ_f)는 식 (13)을 통해 계산하였으며[55], 이때 P 는 최대 하중, L 은 스패의 넓이, b 는 시편의 넓이, d 는 시편의 두께이다.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (12)$$

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (13)$$

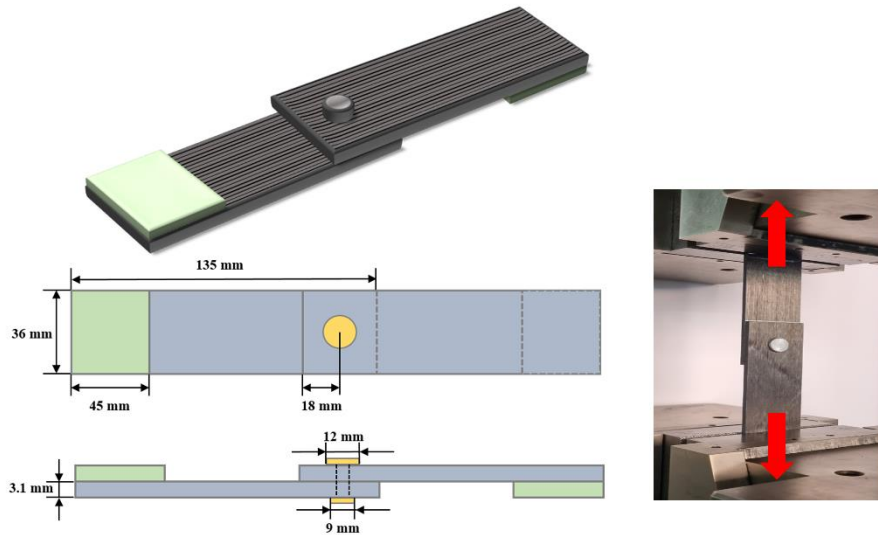


그림 12. 단일 중첩 전단시험 시편 규격.

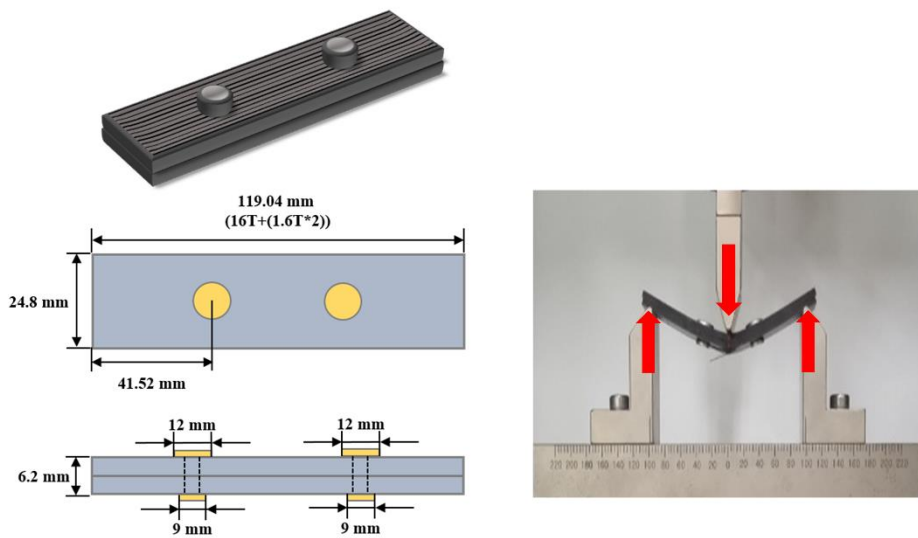


그림 13. 3점 굽힘시험 시편 규격.

제 3 장 결 과

제 1 절 유도가열 및 물성 향상을 위한 조건 설정

3.1.1 유도가열 결과

CFRTP의 첫 번째 유도가열 결과, 탄소섬유 직물 시편이 최대 176°C로 가열되었으며, 무작위의 짧은 탄소섬유와 철가루로 제조된 시편은 62, 87°C로 가열되었다. 두 번째 유도가열 결과, 탄소섬유 직물에 MWCNT를 0, 1, 3 wt% 첨가한 시편이 각각 176.9, 206.5, 215°C로 가열되었으며, 무작위의 짧은 탄소섬유는 MWCNT를 3 wt% 첨가한 시편만 58.2°C로 가열되었다. 짧은 탄소섬유의 경우, 직물 형태의 연속 탄소섬유와 달리 탄소섬유가 무작위로 분포되어 섬유 간 접촉이 효과적으로 이루어지지 않아 닫힌 전기전도성 경로(Closed electrically conductive loop)가 생성되지 않았다. 이로 인해 와전류의 발생이 미비하여 전류가 효과적으로 흐르지 않아 온도가 증가하지 않았다. 또한 가열 온도는 MWCNT의 첨가에 따라 상승하였으며, 첨가 함량이 증가할수록 가열 온도가 증가하였다. 특히 그림 14와 같이 두 번째 유도가열 조건인 탄소섬유 직물에 3 wt%의 MWCNT를 첨가한 시편의 경우 20초 이내에 200°C 이상의 온도로 가열되었다. 이를 통해 직물 형태의 연속된 탄소섬유, 탄소섬유의 부피분을 증가, MWCNT 함량 증가, 주파수 및 전력의 증가가 유도가열의 속도 및 효과를 향상시키는 것을 확인하였다.

표 6. 유도가열 결과

	Reinforcement	MWCNT content (wt%)	Heating condition		Temperature (°C)
			Frequency (kHz)	Power (kW)	
1st test	Carbon fiber fabric (v_f 7%)	1	273	4.1	176
	Short carbon fiber (v_f 7%)				62
	Iron powder (v_f 1.5%)				87
2nd test	Carbon fiber fabric (v_f 50%)	0	403	6.3	176.9
		1			206.5
		3			215
	Short carbon fiber (v_f 15%)	0			×
		1			×
		3			58.2

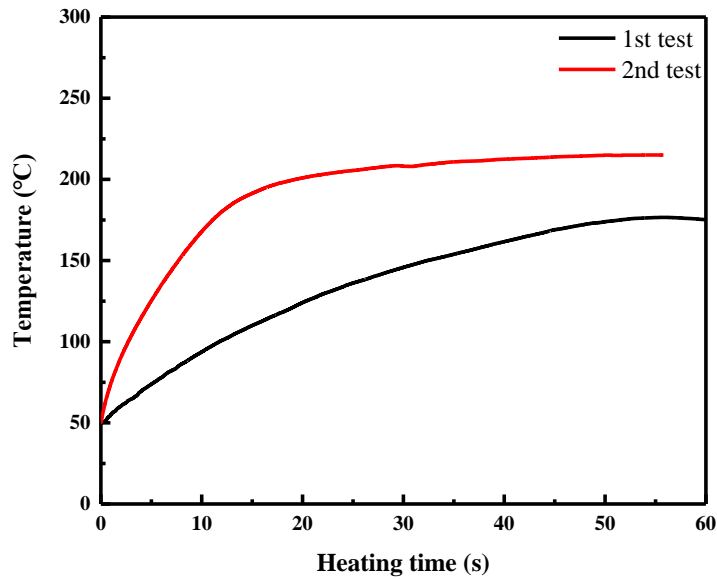


그림 14. 유도가열 예비실험 결과.

(1st - Carbon fiber fabric (v_f 7%) / MWCNT 1wt%,

2nd - Carbon fiber fabric (v_f 50%) / MWCNT 3wt%)

3.1.2 전기전도도 결과

MWCNT 함량별 CFRTP의 저항을 측정하여 계산한 전기전도도를 그림 15에 나타내었다. MWCNT를 첨가하지 않은 시편의 전기전도도는 539.1 S/m이었고, MWCNT를 1, 2, 3, 4 wt% 첨가하였을 때의 전기전도도는 804.8, 907, 985.2, 1078.2 S/m이었다. 특히 MWCNT를 첨가한 시점인 1 wt%에서 전기전도도가 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 이는 그림 16과 같이 섬유 사이 고분자 수지에 MWCNT가 적절히 분산되어 전기전도성 경로를 형성하면서 전기전도도가 증가했기 때문이다[36, 38]. 이를 통해 MWCNT의 함량이 증가할수록 전기전도도가 증가하여 유도가열에 효과적임을 확인하였다.

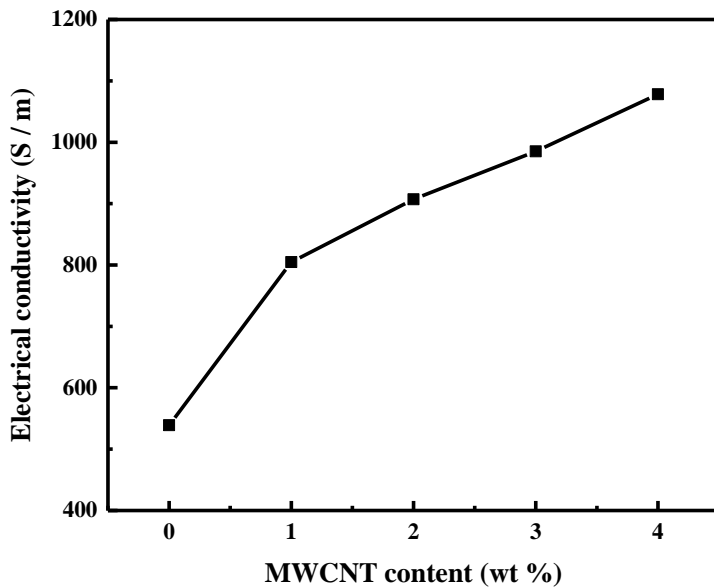


그림 15. MWCNT 함량에 따른 전기전도도.

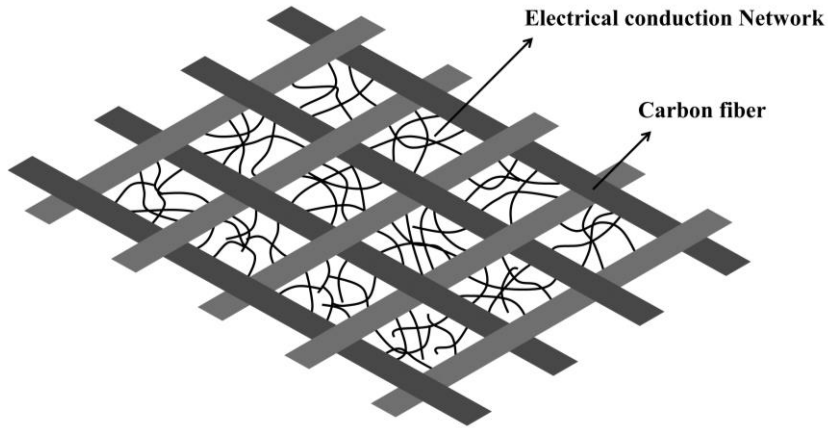


그림 16. MWCNT 분산에 따른 전기전도경로 형성.

3.1.3 충격강도 결과

MWCNT 함량별 CFRTP의 충격강도 결과를 그림 17에 나타내었다. MWCNT를 첨가하지 않은 시편의 충격강도는 48.35 kJ/m^2 이었고, MWCNT를 1, 2, 3, 4 wt% 첨가하였을 때의 충격강도는 53.36, 54.24, 52.61, 48.59 kJ/m^2 로 증가하였다. 초기 MWCNT 함량이 커질수록 충격강도는 증가하다가 2 wt% 함량에서 최댓값을 가지고, 2 wt% 이상의 함량부터 감소하였다. 특히 MWCNT를 가장 많이 첨가한 4 wt%의 충격강도는 MWCNT를 2 wt% 첨가한 충격강도보다 약 12% 감소하였다. 이는 적정 함량의 MWCNT 첨가 시 고분자 수지 사이에서 균열 전파를 억제해 파단을 방해하는 효과가 우수하지만, 적정 함량 이상 첨가 시 수지의 파단이 쉽게 발생할 수 있음을 의미한다. 그림 18은 파단이 발생한 시편의 단면을 SEM을 통해 관측한 결과이다. 1, 2 wt%는 고분자 수지에 MWCNT가 적절히 분포되어 다리(Bridge) 역할을 하여 미세 균열의 전파를 방해하여 충격강도가 증가하였다. 반면 3, 4 wt%의 경우, 파단면에 MWCNT가 응집(Aggregation)되어 있는 것을 확인하였다. 응집된 MWCNT 부분은 강도가 저하되어 충격강도가

감소한다. 이를 통해 MWCNT의 분산이 효과적으로 이루어져 응집되어 있지 않은 상태가 파괴 인성 향상에 유리하며, 적정 함량 이상의 MWCNT 첨가 시 재료의 파괴 인성을 감소시킴을 확인하였다.

앞선 예비 실험을 통하여 직물 형태의 탄소섬유가 유도가열에 효과적임을 확인하였다. 또한 MWCNT 첨가 함량의 증가에 따라 전기전도도가 증가하여 유도가열에 효과적이지만, 적정량 이상의 MWCNT는 재료의 기계적 특성을 감소시켰다. 이를 통해 CFRTP 리벳 제작 시 유도가열 효과와 물성을 높이기 위해 직물 형태의 탄소섬유, 2 wt%의 MWCNT를 사용하는 것으로 결정하였다.

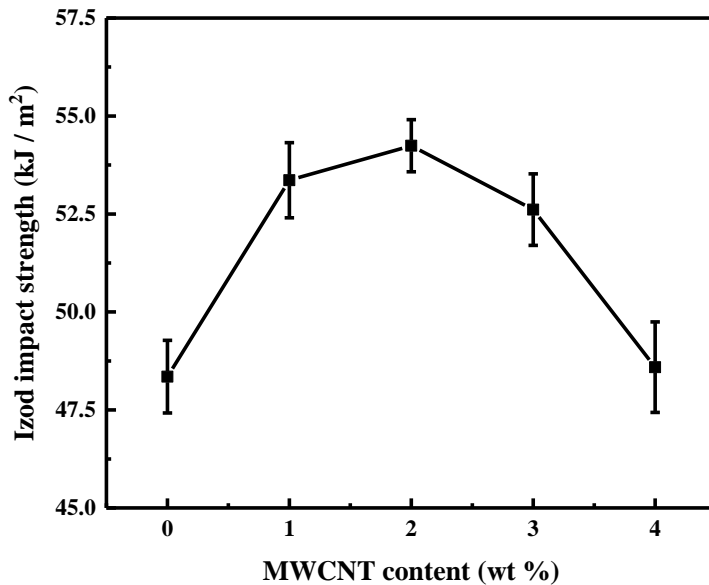
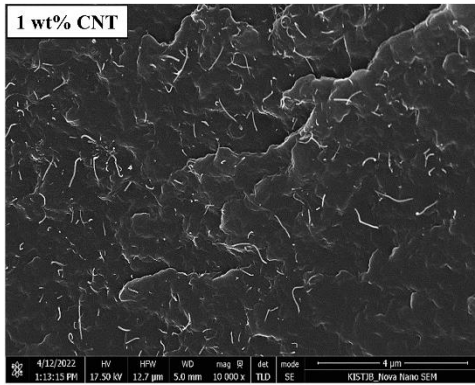
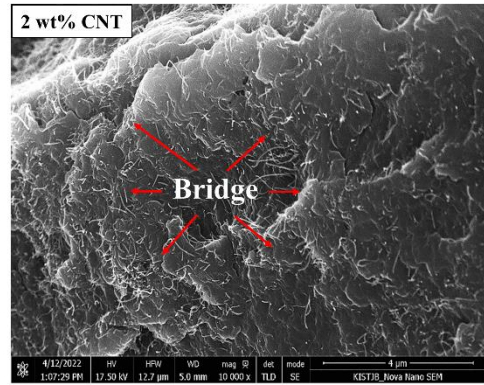


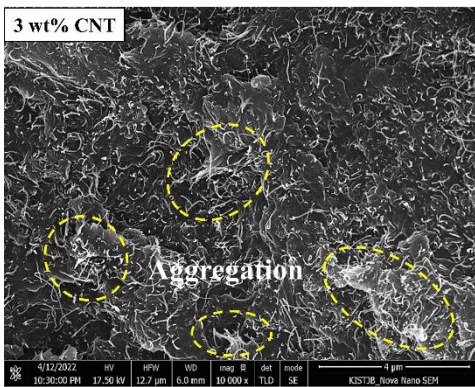
그림 17. MWCNT 함량에 따른 충격강도.



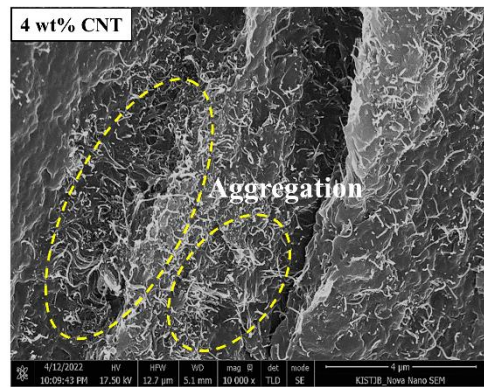
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 18. MWCNT 함량별 아이조드 파단면.

(a) 1 wt%, (b) 2 wt%, (c) 3 wt%, (d) 4 wt%.

제 2 절 CFRTP 리벳 및 체결 판재

3.2.1 CFRTP 리벳

제작한 CFRTP 리벳의 봉 직경은 6 mm, 머리의 직경은 12 mm, 머리를 포함한 전체 길이는 14 mm이다. 디지털 현미경을 이용하여 CFRTP 리벳의 단면을 관측한 결과, 그림 19와 같이 탄소섬유가 연속된 섬유 배향을 이루고 있으나 리벳 제작 시 수직의 섬유 배향이 하중을 받으면서 수평 배향으로 변화된 부분이 관측되었다. 내부 구조 분석을 위해 리벳의 머리, 봉, 머리와 봉 연결 부분의 내부를 3차원 X-ray 현미경(XRM)을 이용하여 이미지 분석하였다. 이미지 분석 결과, 그림 20, 21과 같이 각 파트별 내부 XY, XZ 방향에 미세한 균열이 존재하지만 탄소섬유가 연속된 배향으로 이루어져 있는 것을 확인하였다.

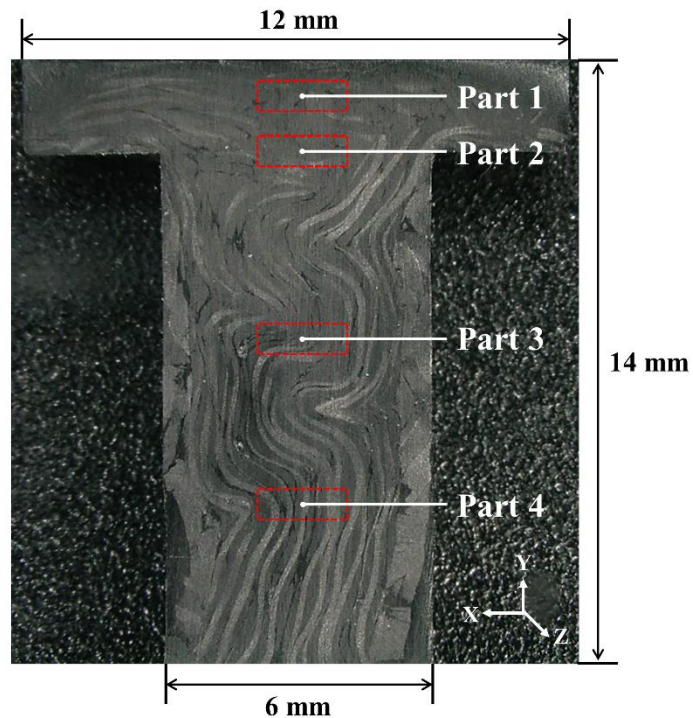
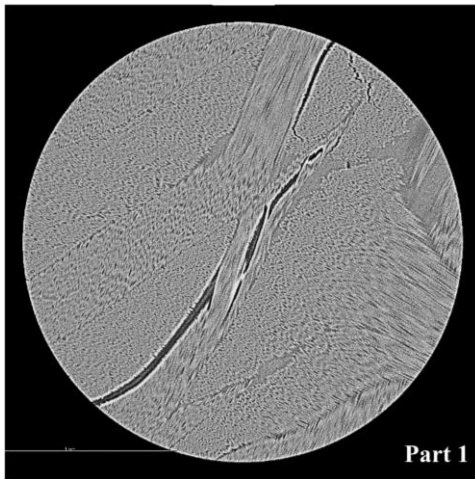
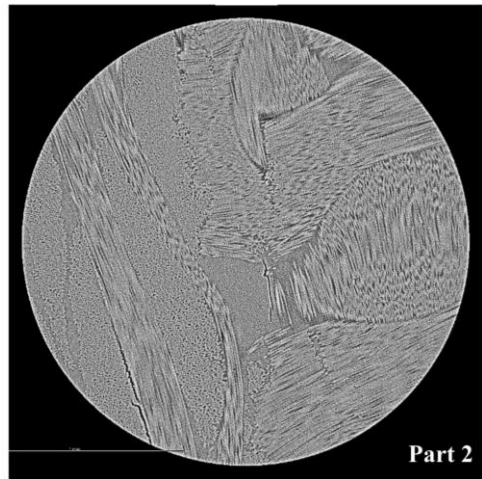


그림 19. CFRTP 리벳 단면. (디지털 현미경 관측)



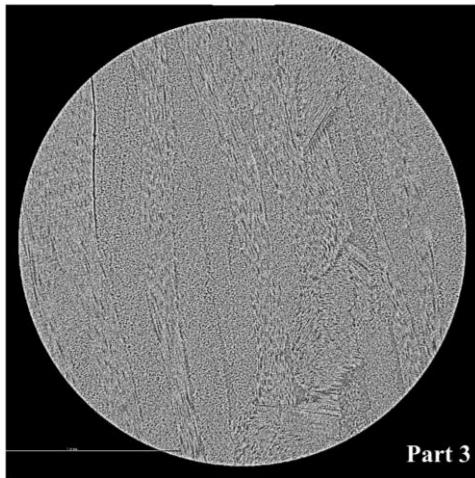
Part 1

(a)



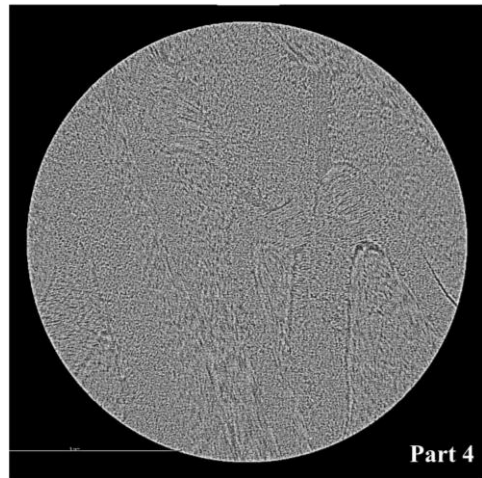
Part 2

(b)



Part 3

(c)

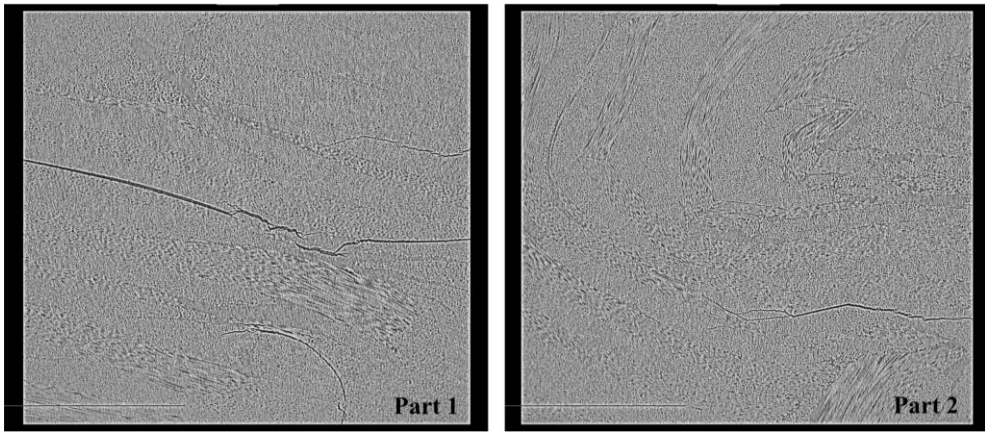


Part 4

(d)

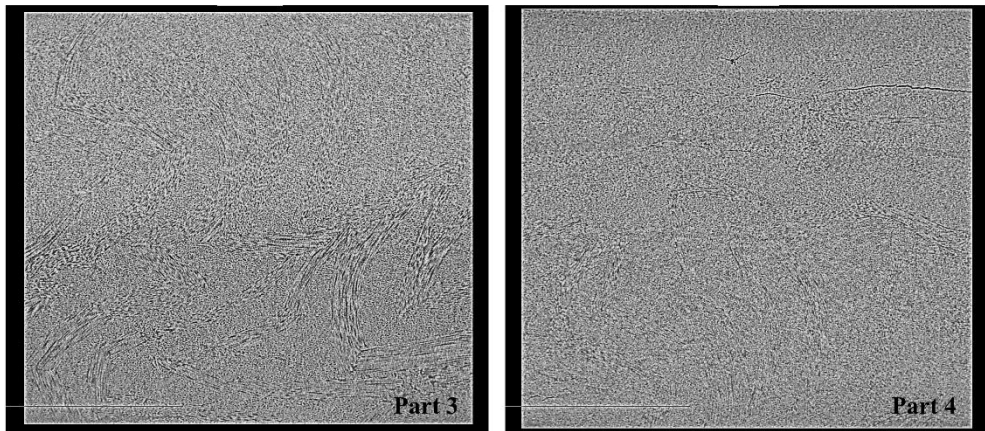
그림 20. CFRTP 리벳 XZ 방향 내부 분석. (XRM 관측)

(a) Part 1, (b) Part 2, (c) Part 3, (d) Part 4.



(a)

(b)



(c)

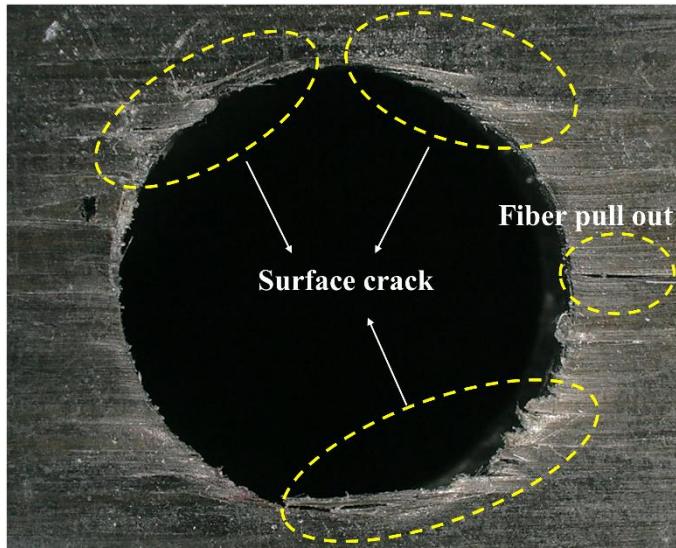
(d)

그림 21. CFRTP 리벳 XY 방향 내부 분석. (XRM 관측)

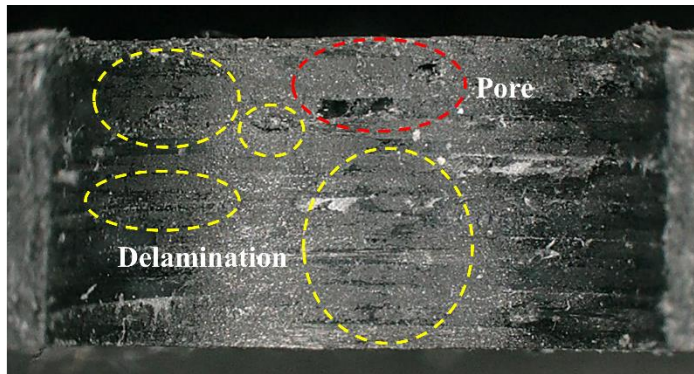
(a) Part 1, (b) Part 2, (c) Part 3, (d) Part 4.

3.2.2 체결 판재 드릴링에 의한 결함

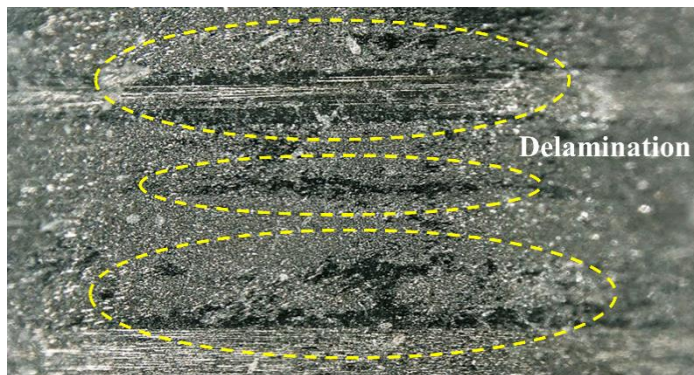
체결 판재인 CFRTP 적층판의 기계적 체결 시 드릴링 장비를 이용하여 체결 구멍을 가공하였다. 드릴링 시 섬유층의 이질성, 이방성, 고마모성 및 단단한 성질과 드릴의 높은 회전 및 이송속도에 의하여 체결 구멍의 입구 및 출구, 절삭면에 박리를 포함한 결함이 발생하였다. 디지털 현미경을 이용하여 체결 구멍 주변을 관측한 결과, 그림 22와 같이 체결 구멍의 출구와 절삭면 영역에서 드릴의 높은 회전 및 이송속도에 의해 복합재료의 층간 접합강도가 감소하면서 섬유층 사이 박리가 발생하였으며, 섬유 배향에 따른 표면 갈라짐 및 섬유의 뽑힘이 발생하였다. 또한 체결 부위 주변의 내부 분석을 위한 X선 컴퓨터 단층촬영(Micro CT) 결과, 그림 23과 같이 체결 구멍 주변에 드릴링에 의한 균열, 박리 및 내부 기공 등이 관측되었다.



(a)

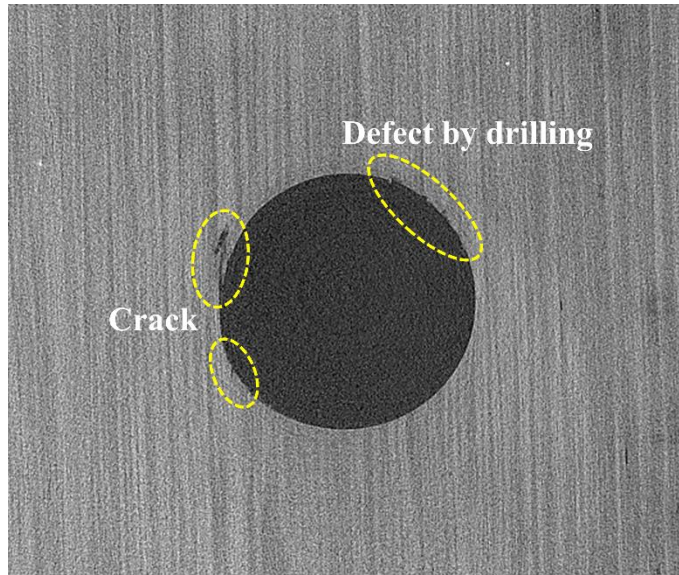


(b)

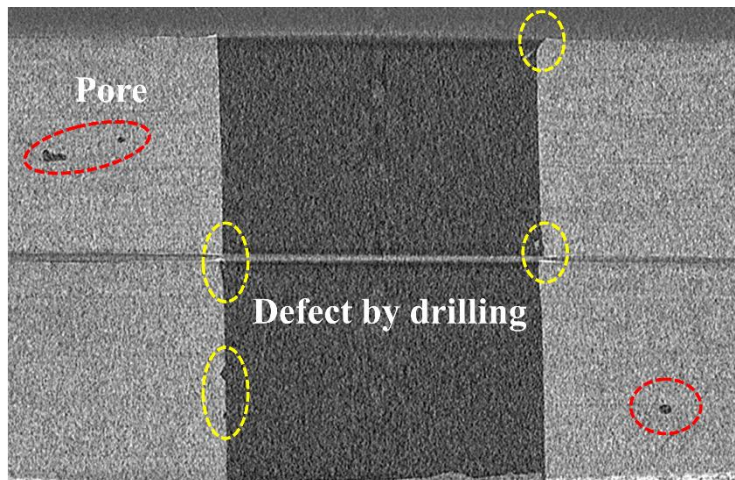


(c)

그림 22. 드릴링에 의한 결함 관측. (디지털 현미경 관측)
 (a) 드릴 출구(30배), (b) 절삭면(30배), (c) 절삭면(200배).



(a)



(b)

그림 23. 드릴링에 의한 결함 관측. (Micro CT 관측)

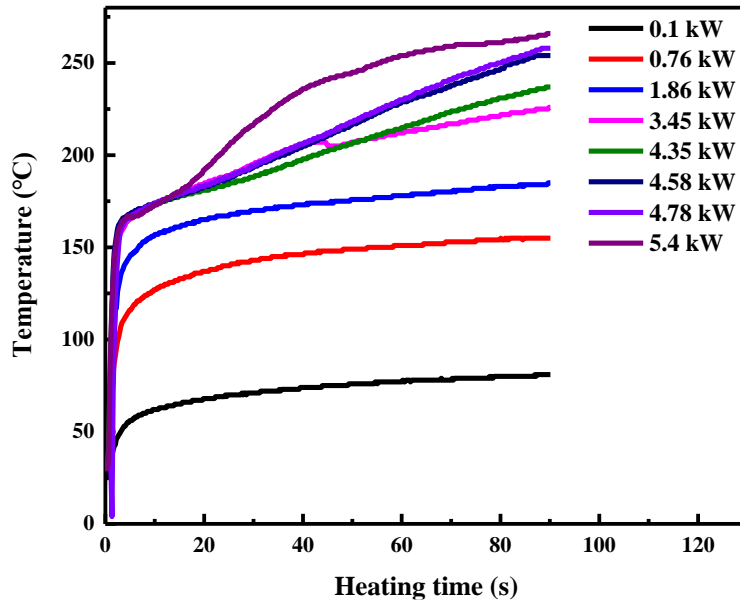
(a) XZ 방향, (b) XY 방향.

제 3 절 CFRTP 리벳 체결 및 박리 보수

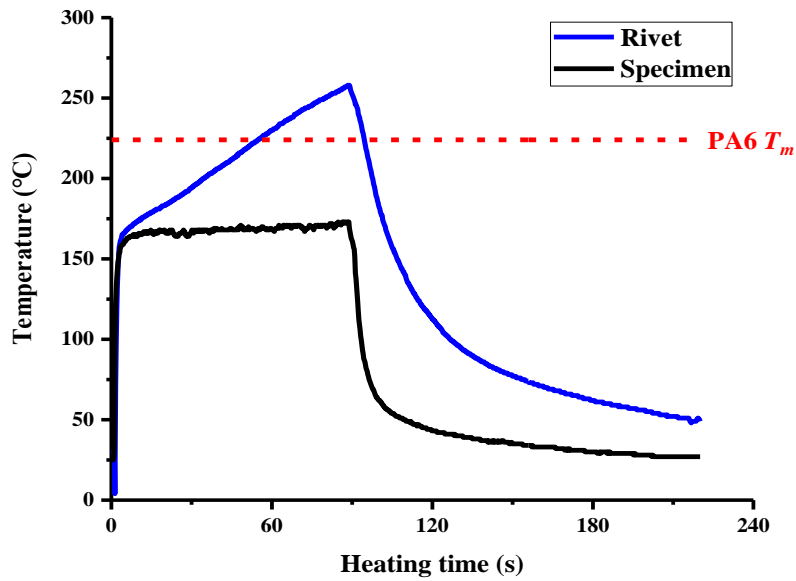
3.3.1 CFRTP 리벳 체결

CFRTP 리벳을 215~220 kHz 주파수에서 전력을 변화시켜 유도 가열을 진행한 결과, 다음의 온도 경향을 보였다. 단일 중첩 전단 시편은 220 kHz 주파수 조건에서 전력을 0.1, 0.76, 1.86, 3.45, 4.35, 4.58, 4.78, 5.4 kW로 변화시켜 90초 동안 가열한 결과 81, 155, 185, 226, 237, 254, 258, 266℃로 가열되었다. 굽힘 시편은 215 kHz 주파수 조건에서 전력을 0.1, 0.76, 1.86, 3.45, 5.4, 6.3 kW로 변화시켜 90초 동안 가열한 결과 107, 152, 168, 186, 231, 250℃로 가열되었다. 두 가열 조건 모두 10초 이내에 급격한 온도 증가를 보였으며 시간이 지남에 따라 일정 속도로 온도가 증가하다가 일정 온도 도달 후 온도가 유지되었다. 전력 변화에 따른 최대 온도를 표 7에 요약하였다.

CFRTP 리벳의 전력 변화에 따른 유도가열 결과, 체결에 적합한 온도 증가를 보여준 조건(단일 중첩 전단 시편-4.78 kW 전력, 굽힘 시편-6.3 kW 전력)을 이용하여 체결을 진행하였다. 이때 CFRTP 리벳과 리벳 주변 체결 판재의 온도를 측정된 결과, 단일 중첩 전단 시편의 리벳은 258℃, 체결 판재는 173℃로 온도가 증가하였으며, 굽힘 시편의 리벳은 250℃, 체결 판재는 138℃로 온도가 증가하였다. 이때 체결 판재는 변형이 발생하지 않는 고분자 수지 용융점 이하의 온도로 가열되었으며, CFRTP 리벳은 고분자 수지의 용융점 이상의 온도로 국부가열되어 수지의 유동에 의한 체결이 가능한 상태로 가열되었다. 체결을 위해 용융 상태의 CFRTP 리벳을 머리와 벡테일 형상에 맞는 금형에 위치시킨 후 하중을 가하여 두 개의 체결 판재를 고정하였다.



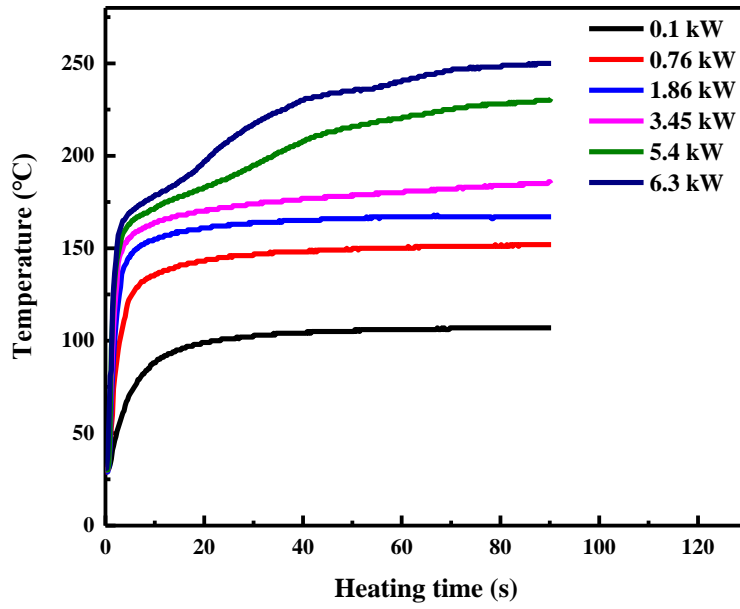
(a)



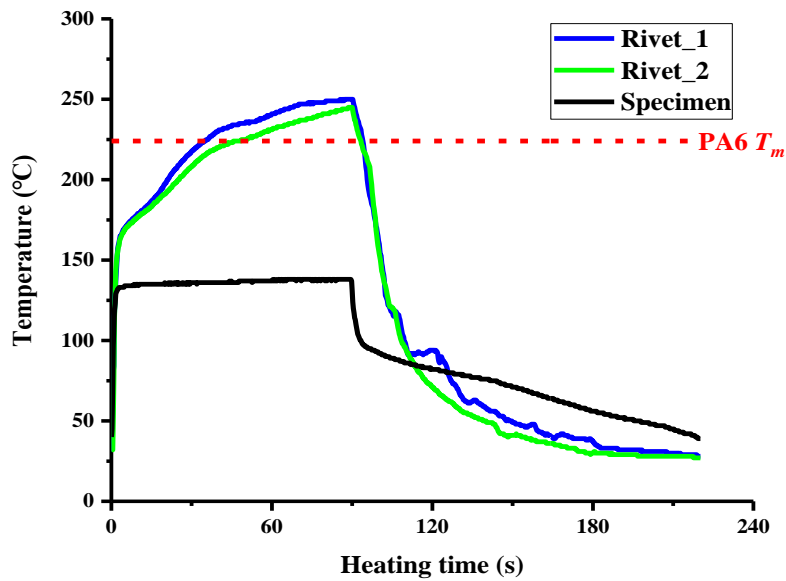
(b)

그림 24. 단일 중첩 전단 시편 유도가열.

(a) 전력에 따른 가열 경향, (b) 220 kHz / 4.78 kW 유도가열 결과.



(a)



(b)

그림 25. 3점 굽힘 시편 유도가열.

(a) 전력에 따른 가열 경향, (b) 215 kHz / 6.3 kW 유도가열 결과.

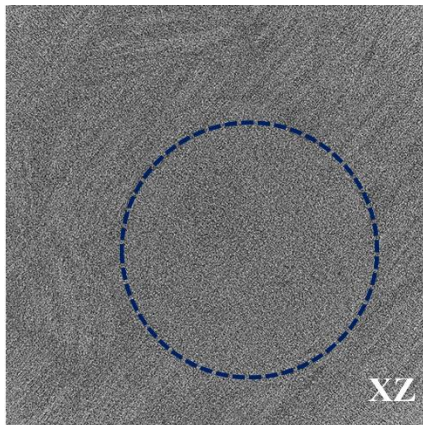
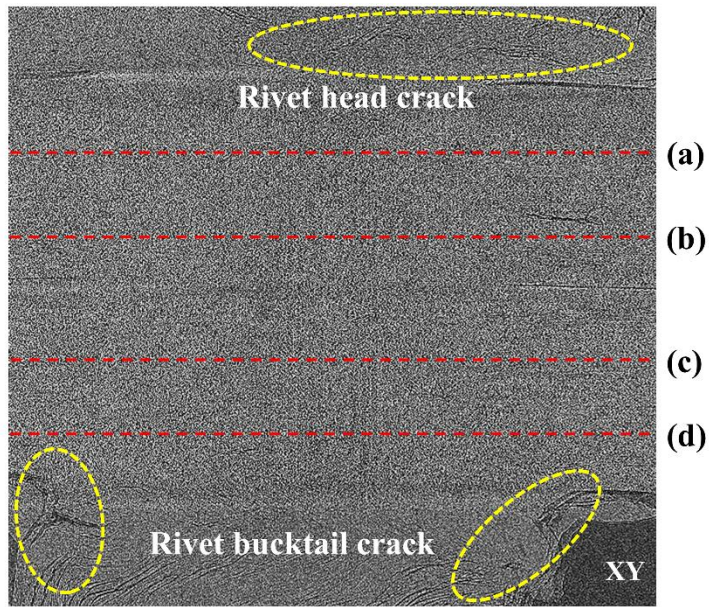
표 7. 전력 변화에 따른 CFRTP 리벳과 체결 판재의 가열 온도

	Frequency (kHz)	Power (kW)	Max. temperature (°C)		
			Rivet 1	Rivet 2	Specimen
Lap shear test specimen	220	0.1	81		140
		0.76	155		152
		1.86	185		164
		3.45	226		170
		4.35	237		176
		4.58	254		185
		4.78	258		173
		5.4	266		177
Bending test specimen	215	0.1	107	104	56
		0.76	152	149	91
		1.86	168	165	114
		3.45	186	175	128
		5.4	231	226	138
		6.3	250	245	138

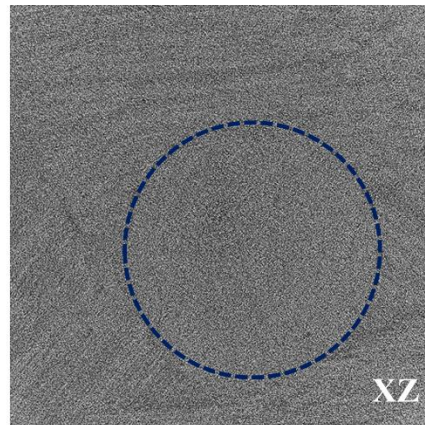
3.3.2 박리 보수 평가

CFRTP 리벳의 유도가열을 이용한 체결을 통해 드릴링에 의한 결함이 보수되었다. 그림 26과 같이 CFRTP 리벳으로 체결된 판재의 XY 방향 관측 시 드릴링에 의한 박리 및 결함 사이로 용융된 고분자 수지가 주입되면서 보수되었다. 체결 부위의 네 구간 XZ 방향을 관측한 결과, 벽테일의 균열, CFRTP 리벳 내부에 존재하는 미세 기공 및 균열을 제외한 드릴링에 의한 결함이 관측되지 않은 것을 통해 결함이 보수된 것을 확인할 수 있었다.

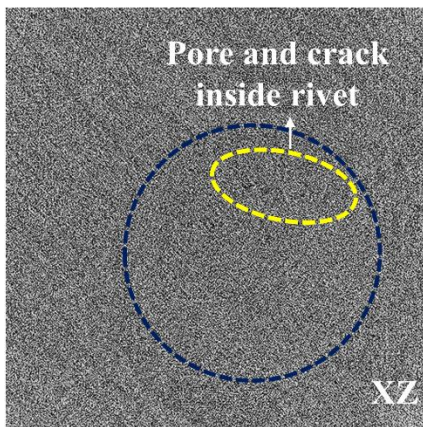
CFRTP 리벳의 박리 보수를 확증하기 위해 추가 박리 보수 평가를 진행하였다. 이때 MWCNT로 인한 검은색의 고분자 수지가 박리 사이로 주입되어 보수되는 것을 관찰하기 위해 유리섬유강화 복합재료 적층판을 체결 판재로 사용하였다. 핫프레스를 이용하여 240℃ 온도에서 60초간 리벳팅을 진행하였고, 일정 하중을 가한 상태에서 수냉시켜 리벳팅을 진행하였다. CFRTP 리벳으로 체결된 시편의 단면을 디지털 현미경으로 관측한 결과, 드릴링에 의한 박리 사이로 용융된 고분자 수지가 주입되어 보수되었다. 이를 그림 27에 나타내었다.



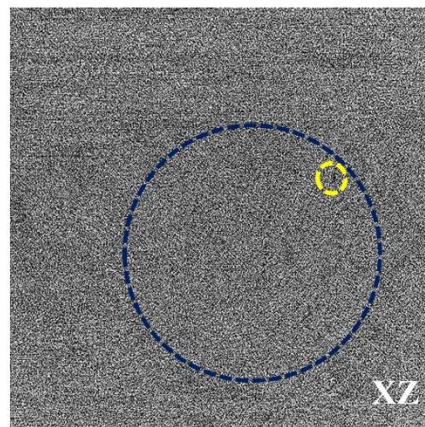
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 26. 박리 보수 관측. (Micro CT 관측)

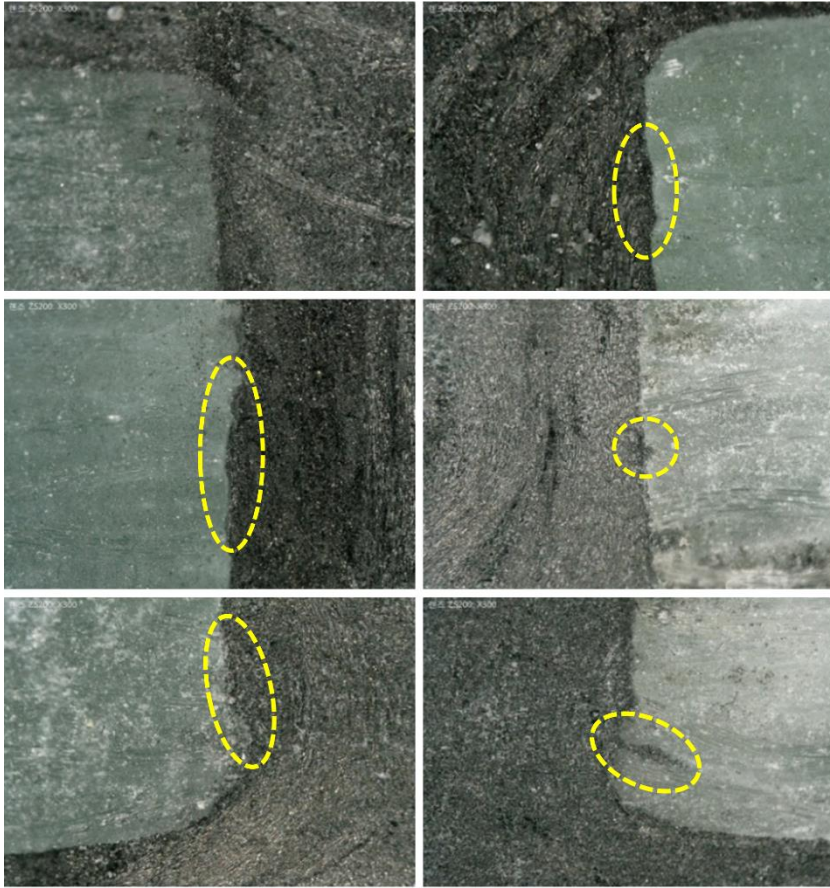


그림 27. 박리 보수 관측. (디지털 현미경 관측)

제 4 절 기계적 물성

3.4.1 베어링강도(Bearing strength)

리벳으로 체결한 CFRTP 시편의 단일 중첩 전단시험을 통하여 베어링강도를 측정하였다. 그림 28과 같이 알루미늄 리벳으로 체결된 CFRTP 시편은 인장이 가해짐에 따라 알루미늄 리벳 중앙에 전단력이 가해져 소성 변형되어 연성 파괴되었다. 이때 알루미늄 리벳은 평균 2701.2 N의 최대 하중을 견뎠으며, 145.2 MPa의 베어링강도를 나타내었다.

CFRTP 리벳으로 체결한 CFRTP 시편은 그림 29와 같이 인장이 가해짐에 따라 CFRTP 리벳 중앙에 전단력이 가해져 취성 파괴되었다. 단일 중첩 전단시험 시 응력을 가장 많이 받은 부분은 두 개의 체결 판재 사이인 리벳의 중앙이었다. 리벳의 중앙에 응력이 집중됨에 따라 균열이 발생하였고, 응력이 증가함에 따라 균열이 전파하여 파괴되었다. 이때 발생한 균열은 리벳 내 탄소섬유의 수직 배향이 굽어지면서 발생한 고분자 영역으로 전파되었다. CFRTP 리벳은 평균 3094.4 N의 최대 하중을 견뎠으며, 166.4 MPa의 베어링강도를 나타내었다.

CFRTP 판재에 체결한 CFRTP 리벳은 유도가열 후 체결이 이루어진다. 이때 발생하는 문제점으로 용융된 CFRTP 리벳이 상온에서 체결됨에 따라 수지의 온도가 급격하게 저하되어 균일한 표면의 원형 벽테일이 아닌 불균일한 표면의 타원형 벽테일이 생성된다. 이러한 문제로 인해 두 개의 체결 판재의 완전한 체결이 이루어지지 않아 물성을 저하시키는 요소로 작용될 수 있기 때문에 완전한 체결의 필요성이 있다. 이에 따라 CFRTP 리벳의 완전한 체결을 위해 고분자 수지의 용융점 이상 온도가 유지되는 조건 하에서 체결이 요구된다.

이에 따라 완전히 체결된 CFRTP 리벳의 물성을 알아보기 위한 추가 물성 평가를 진행하였다. 추가 물성 평가를 위한 체결 시 일정한 온도와 힘을 유지할 수 있는 핫프레스를 이용하였다. 이때 기존 체결 판재인 CFRTP 시편은 열가소성 수지로 구성되어 핫프레스를 이용한 리벳팅 시 판재의 변형이 생길 가능성이 있으므로 열경화성 수지로 구성된 GFRP를 체결 판재로 사용하였다.

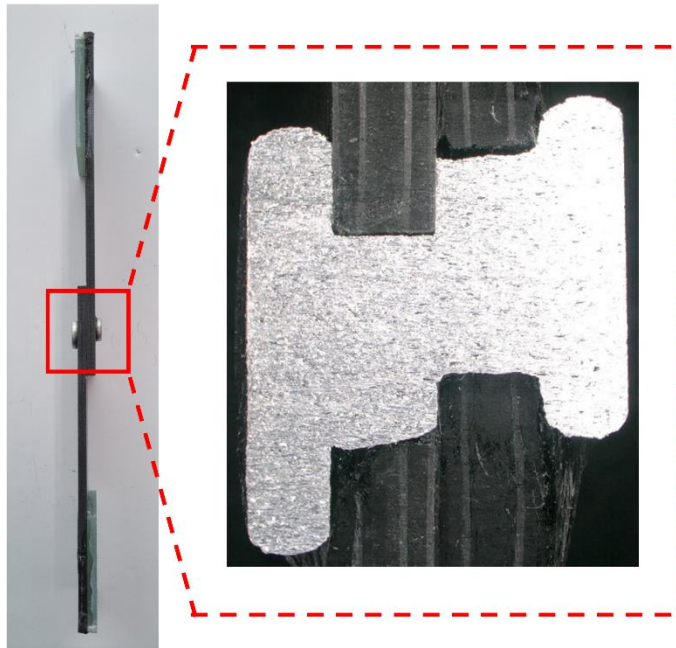
알루미늄 리벳으로 체결한 GFRP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과, 그림 30과 같이 시편에 인장이 가해짐에 따라 리벳에 전단이 가해져 소성 변형되어 연성 파괴되었다. 이때 평균 2883.4 N의 최대 하중을 견뎠으며, 155 MPa의 베어링강도를 나타내었다.

CFRTP 리벳으로 체결한 GFRP 시편은 그림 31과 같이 시편에 인장이 가해짐에 따라 CFRTP 리벳에 전단이 가해져 취성 파괴되었다. 이때 두 개의 체결 판재 사이인 리벳 중앙에 응력이 집중되어 균열이 발생 및 전파함에 따라 파괴가 발생하였다. 이때 평균 3918.6 N의 최대 하중을 견뎠으며, 210.7 MPa의 베어링강도를 나타내었다.

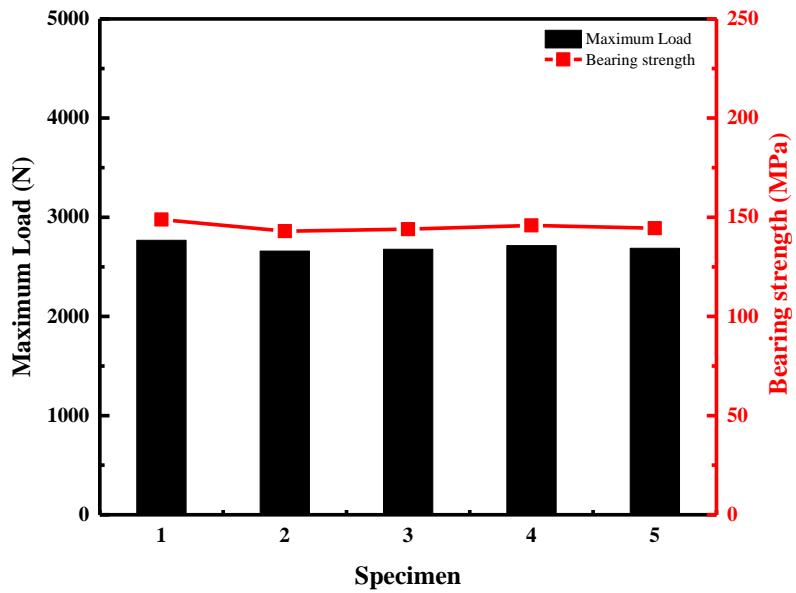
앞선 단일 중첩 전단시험과 비교하여 체결 판재의 변화에 따른 물성 차이의 이유는 다음과 같다. 복합재료 적층판의 기계적 특성은 원료의 특성, 섬유 배향, 제조 공정 및 섬유와 수지의 상용성 등의 요인에 의해 영향을 받는다. 특히 강화재와 기지재는 화학적으로 다르기 때문에 계면에서의 접착이 중요하다. 일반적으로 복합재료 제조 시 열경화성인 에폭시는 예비 중합체 단계에서 섬유를 함침 시키는 반면, 열가소성인 PA6는 섬유 침투 및 함침 과정에서 이미 중합이 발생하기 때문에 에폭시 복합재료가 PA6 복합재료보다 우수한 계면 결합력 및 균일한 섬유 분포를 나타낸다. 또한 PA6는 에폭시에 비해 용융 점도가 더 높아 성형성이 낮다. 이로 인해 PA6 복합재료는 에폭시 복합재료에 비해 불균일한 섬유 분포를 가지며 섬유 정렬 불량, 기공 및 비함침 등의

결함을 야기하여 기계적 강도가 저하된다[56, 57].

또한 실험에 사용된 CFRTP 적층판은 준등방성 구조로, 직교 구조의 GFRP 적층판과 비교하여 다양한 방향의 하중에 견딜 수 있다는 장점이 있지만, 인장과 같은 특정 방향에서의 기계적 강도가 저하된다. CFRTP 적층판은 유도가열을 통한 체결 시 용융된 수지가 상온에서 급격하게 온도 저하되면서 불균일한 벽테일을 형성하여 효과적인 체결이 이루어지지 않은 반면, 핫프레스를 이용한 체결 시 수지의 용융점 이상의 온도에서 체결된 GFRP 적층판은 균일한 벽테일이 형성되어 효과적인 체결이 진행됨에 따라 기계적 물성이 증가한 것으로 판단된다.

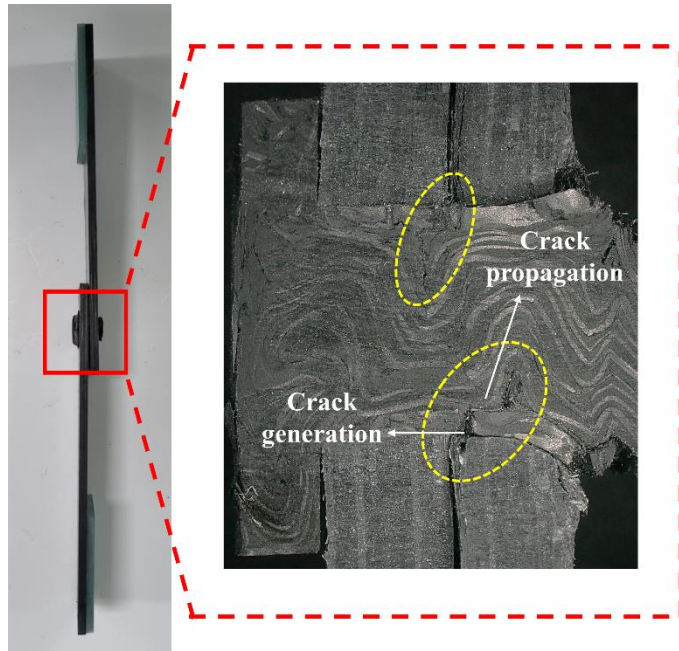


(a)

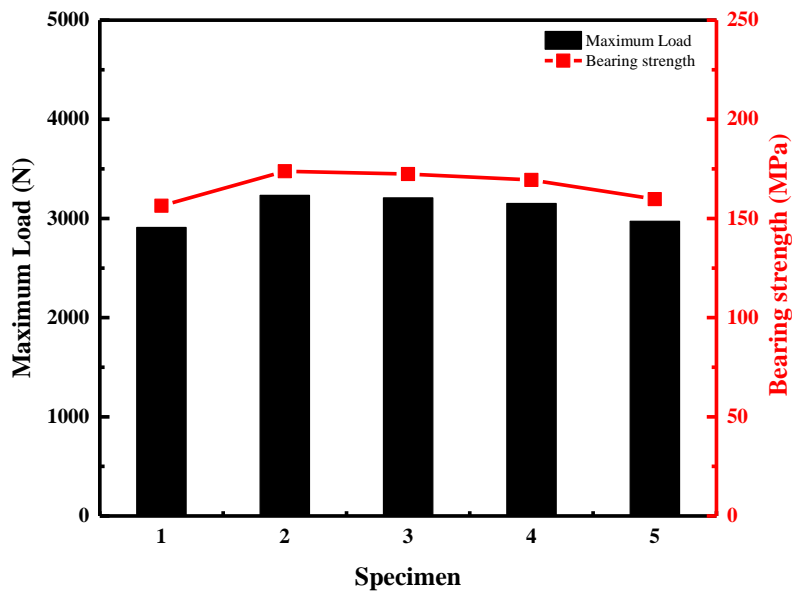


(b)

그림 28. 알루미늄 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프.

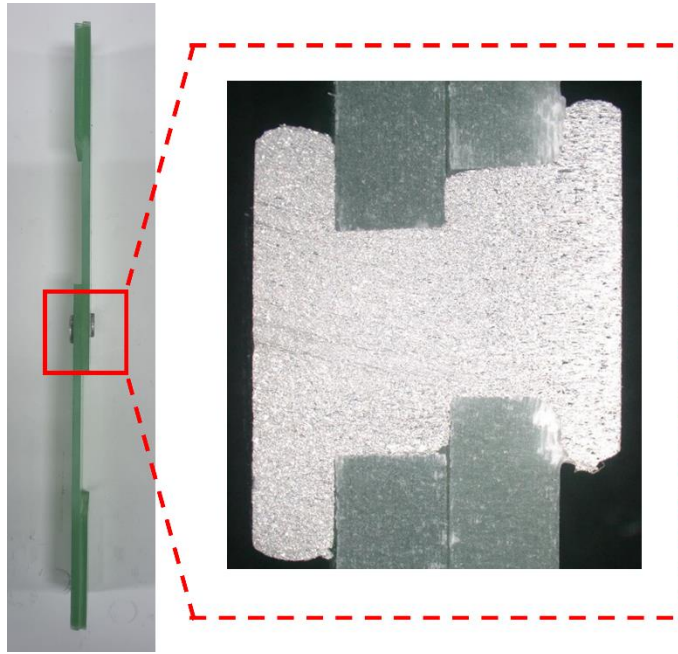


(a)

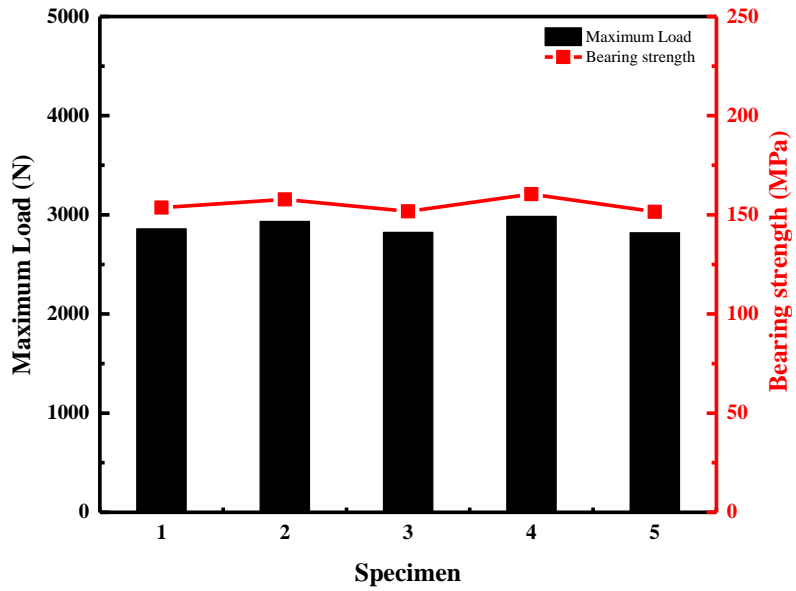


(b)

그림 29. CFRTP 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프.

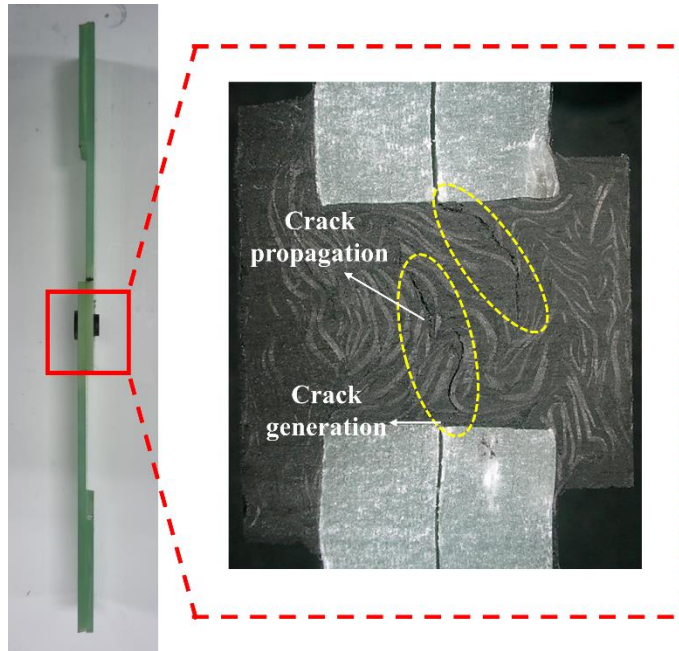


(a)

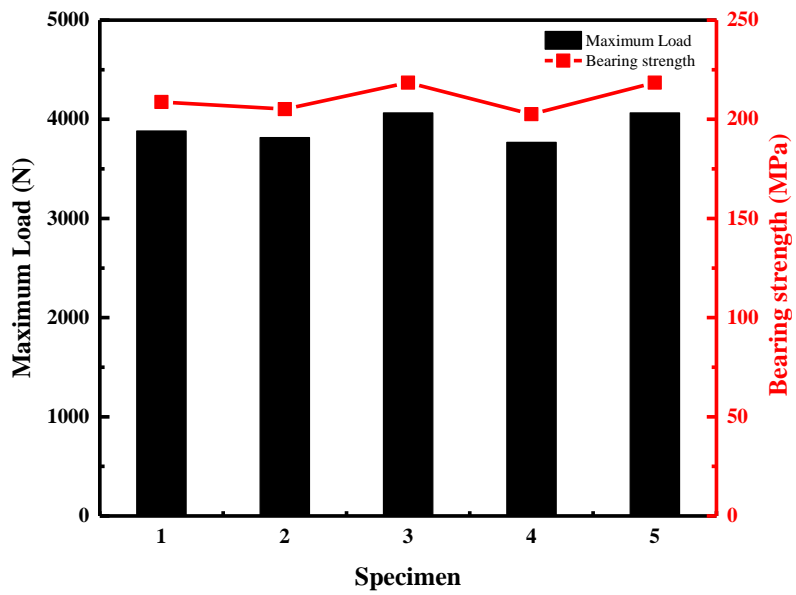


(b)

그림 30. 알루미늄 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프.



(a)



(b)

그림 31. CFRTP 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 단일 중첩 전단시험 결과. (a) 파단면, (b) 최대 하중 및 베어링강도 그래프.

3.4.2 굴곡강도(Flexural strength)

리벳으로 체결한 CFRTP 및 GFRP 시편의 굽힘시험을 통하여 굴곡강도를 측정하였다. 알루미늄 리벳으로 체결된 CFRTP 시편은 그림 32와 같이 하중이 가해짐에 따라 알루미늄 리벳에 인장, 압축 및 회전력이 가해져 소성 변형되었다. 초기 하중이 가해짐에 따라 두 개의 체결 판재 사이인 리벳의 중앙에 응력이 집중되었으며, 하중이 증가함에 따라 시편이 굴곡되어 리벳의 중앙과 머리 부분에 응력이 집중되었다. 이때 하중을 받는 지점을 기준으로 리벳의 인접한 부분에 압축 및 회전이, 리벳의 먼 부분에 인장 및 회전이 작용하였다. 알루미늄 리벳은 굽힘 시 평균 1911.0 N의 최대 하중을 견뎠으며, 279.9 MPa의 굴곡강도를 나타내었다.

CFRTP 리벳으로 체결한 CFRTP 시편은 그림 33과 같이 하중이 가해짐에 따라 CFRTP 리벳에 인장, 압축 및 회전력이 가해져 취성 파괴되었다. 이때 하중을 받는 지점으로부터 리벳의 먼 부분의 봉과 머리 부분에서 균열이 발생하였고, 하중이 증가함에 따라 균열이 전파하여 파괴되었다. CFRTP 리벳은 굽힘 시 평균 1246.6 N의 최대 하중을 견뎠으며, 195.0 MPa의 굴곡강도를 나타내었다.

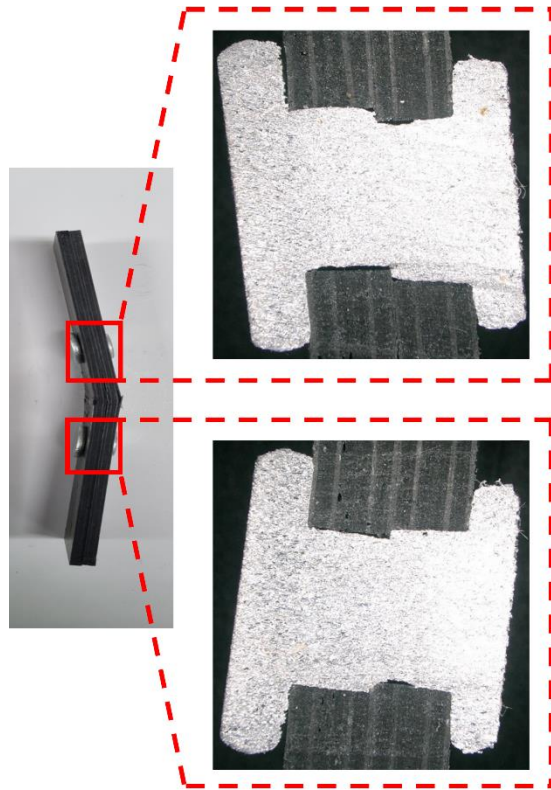
알루미늄 리벳으로 체결한 GFRP 시편의 굽힘시험 결과, 그림 34와 같이 리벳이 인장, 압축 및 회전력이 가해져 소성 변형되었다. 이때 알루미늄 리벳은 평균 1622.9 N의 최대 하중을 견뎠으며, 261.7 MPa의 굴곡강도를 나타내었다.

CFRTP 리벳으로 체결한 GFRP 시편의 굽힘시험 결과, 그림 35와 같이 CFRTP 리벳에 인장, 압축 및 회전력이 가해져 취성 파괴되었다. 이때 리벳의 완전한 체결로 인해 리벳 중앙에 응력이 집중되어 균열이 발생 및 전파함에 따라 파괴가 발생하였다. CFRTP 리벳은 평균 1549.4 N의 최대 하중을 견뎠으며, 249.8 MPa의 굴곡강도를

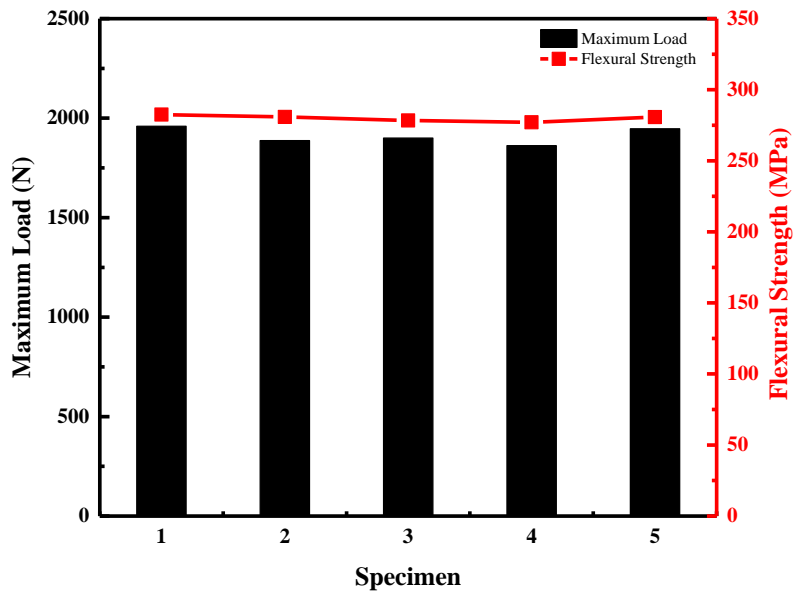
나타내었다.

굽힘시험 결과, 체결 관재의 종류에 따라 물성 결과 값이 상이했다. 열경화성 수지로 이루어진 GFRP는 기계적 성질이 우수하지만 부서지기 쉬우며, 균열 발생 및 균열 전파에 대한 저항성이 낮은 반면, 열가소성 수지로 이루어진 CFRTP는 상대적으로 균열 전파에 대한 저항성이 높아 파괴인성이 우수하다. 그림 36과 같이 알루미늄 리벳으로 체결한 CFRTP, GFRP 굽힘 시편의 파단면을 관측한 결과, CFRTP 시편은 하중 증가에 따른 굽힘에 의해 가로 방향으로 균열이 생성되었다. 반면에 GFRP 시편은 하중 증가에 따른 굽힘에 의해 가로세로 방향으로 균열이 생성됨에 따라 시편이 파괴되었다.

이를 통해 CFRTP 시편이 GFRP 시편보다 굽힘에 대한 물성이 더 우수하며, 굽힘시험에서 CFRTP 리벳의 완전한 체결이 이루어졌을 경우 리벳의 머리 주변 부분이 아닌 리벳 중앙에 응력이 집중됨을 확인할 수 있었으며 물성이 증가하였다.



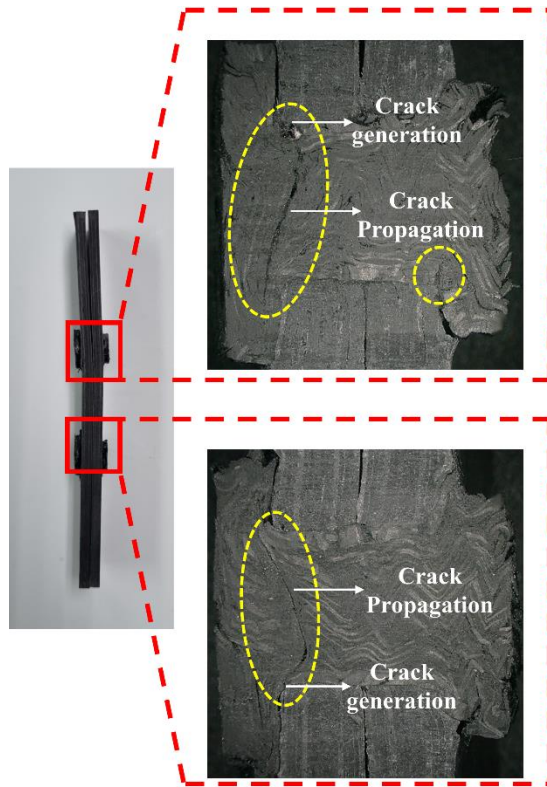
(a)



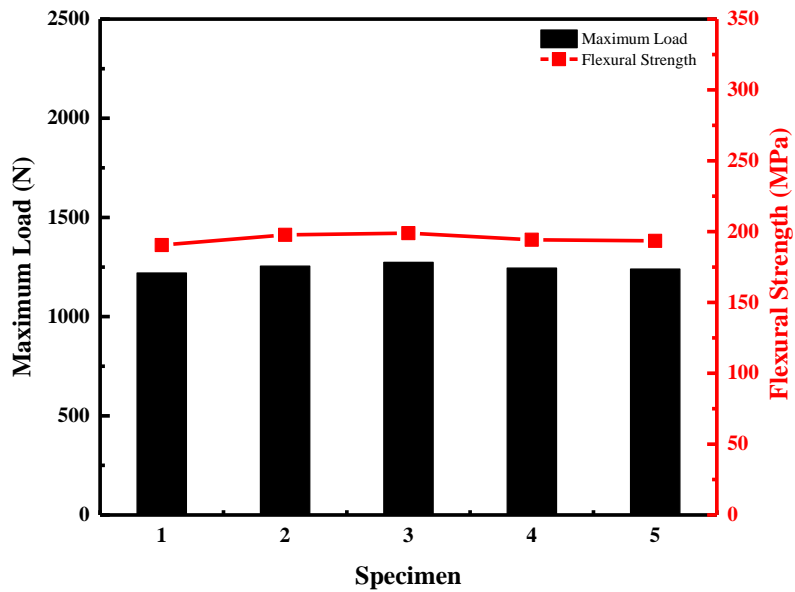
(b)

그림 32. 알루미늄 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 굽힘시험 결과.

(a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.



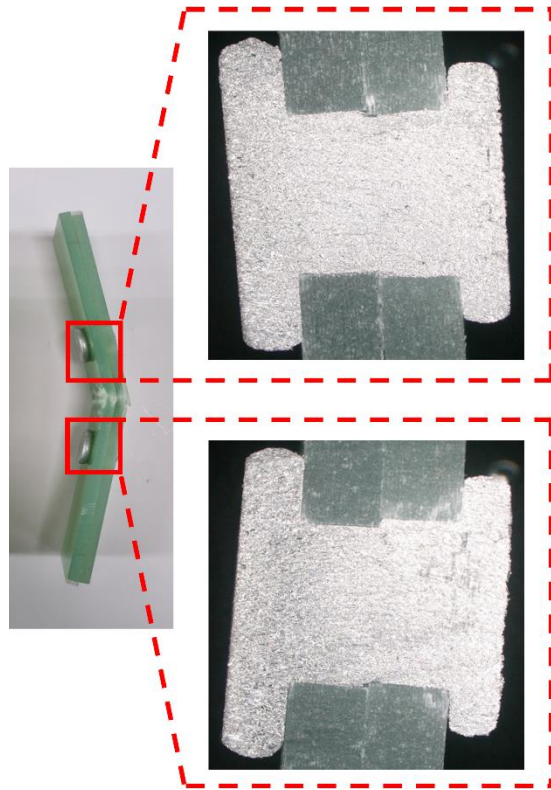
(a)



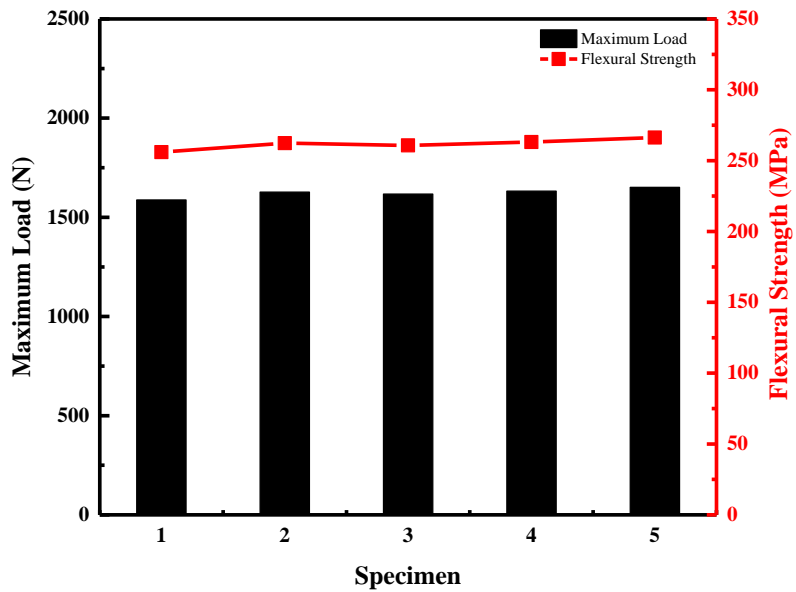
(b)

그림 33. CFRTP 리벳으로 체결된 CFRTP 시편의 굽힘시험 결과.

(a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.



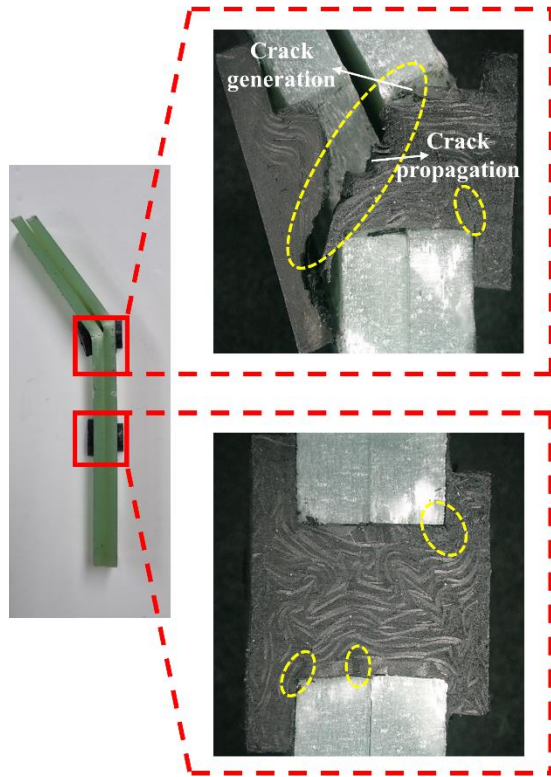
(a)



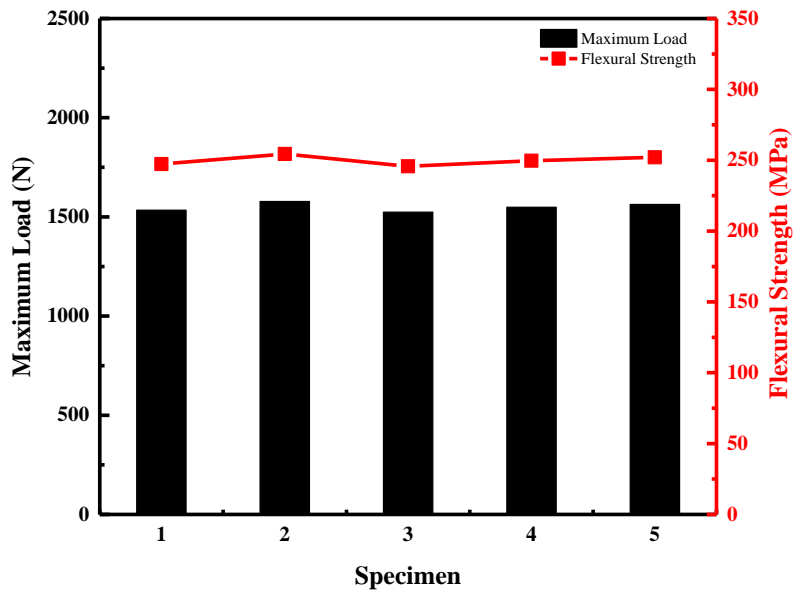
(b)

그림 34. 알루미늄 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 굽힘시험 결과.

(a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.



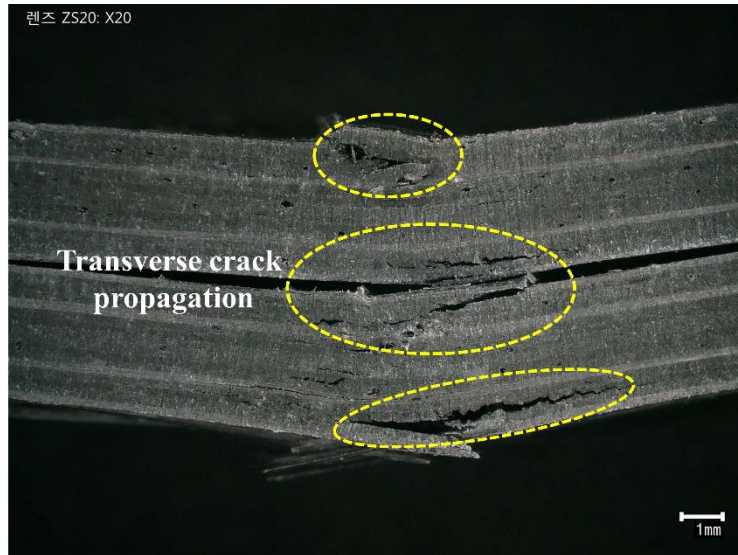
(a)



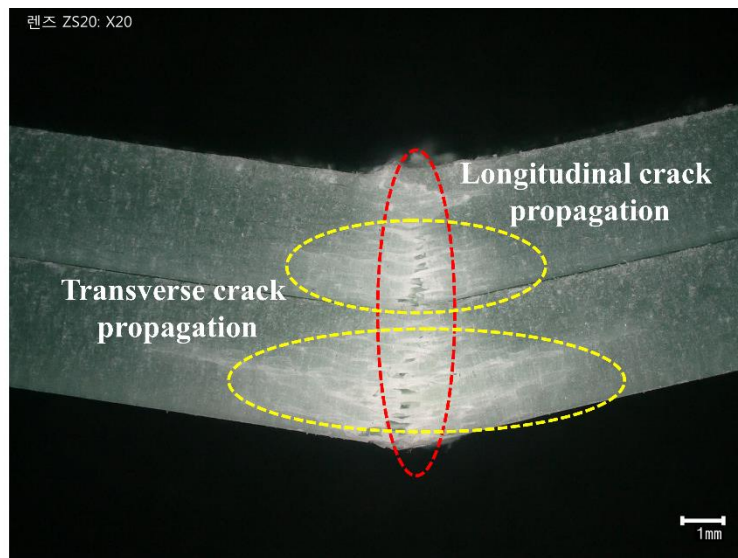
(b)

그림 35. CFRTP 리벳으로 체결된 GFRP 시편의 굽힘시험 결과.

(a) 파단면, (b) 최대 하중 및 굴곡강도 그래프.



(a)



(b)

그림 36. 굽힘시험에 따른 파단면.

(a) CFRTP 시편, (b) GFRP 시편.

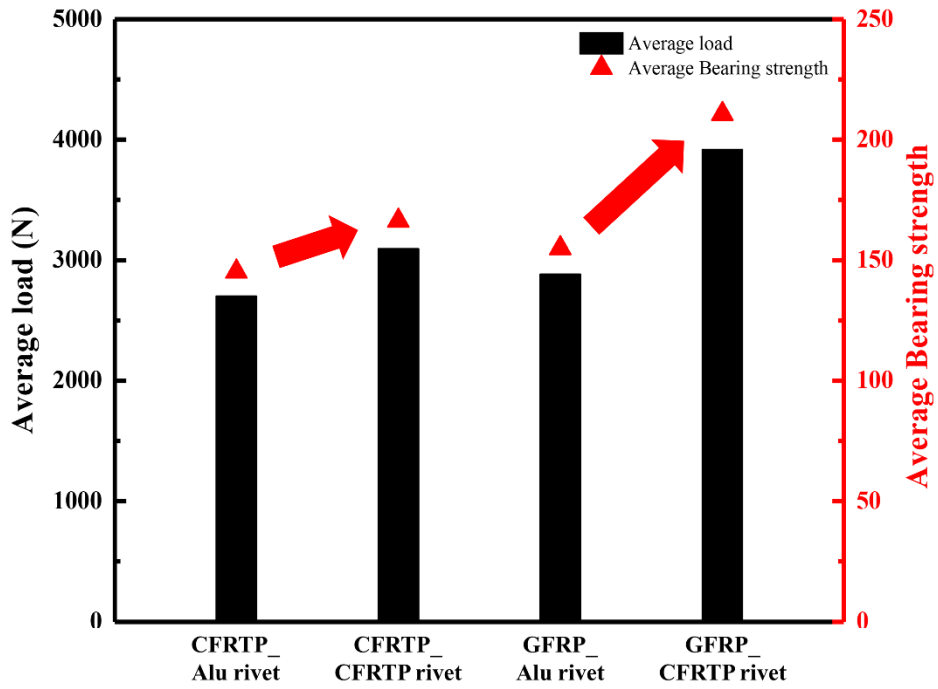
3.4.3 기계적 물성 평가 요약

CFRTP 시편의 단일 중첩 전단시험의 경우 CFRTP 리벳은 알루미늄 대비 베어링강도가 15% 증가하였으며, 완전한 체결이 이루어진 GFRP 시편은 알루미늄 대비 36% 증가하였다. CFRTP 시편의 굽힘시험의 경우 CFRTP 리벳은 알루미늄 리벳 대비 굴곡강도가 30% 감소하였으나, 완전한 체결이 이루어진 GFRP 시편은 알루미늄 대비 4.5% 감소하였다.

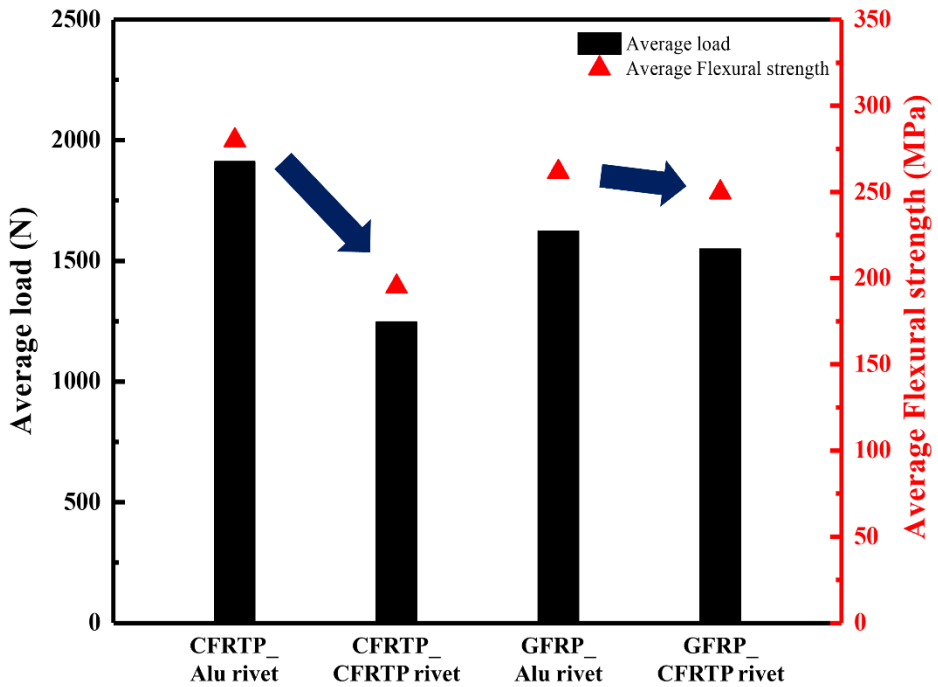
이를 통하여 완전한 체결이 이루어졌을 경우, CFRTP 리벳이 알루미늄 리벳과 비교하여 전단에 버티는 힘이 우수하며, 인장, 압축, 회전이 동반된 복합적인 힘에는 알루미늄 리벳에 유사한 강도를 나타내었다.

표 8. 기계적 물성 평가 요약

	Lap shear test		Bending test	
	Load (N)	Bearing strength (MPa)	Load (N)	Flexural strength (MPa)
CFRTP_Alu rivet	2701.2	145.2	1911.0	279.9
CFRTP_CFRTP rivet	3094.4	166.4 (15%↑)	1246.6	195.0 (30%↓)
GFRP_Alu rivet	2883.4	155.0	1622.9	261.7
GFRP_CFRTP rivet	3918.6	210.7 (36%↑)	1549.4	249.8 (4.5%↓)



(a)



(b)

그림 37. 기계적 물성 평가 요약.

(a) 단일 중첩 전단시험, (b) 굽힘시험.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 기계적 체결 시 발생하는 단점을 개선하고 금속 체결 부품을 대체하기 위해 유도가열을 이용한 열가소성 탄소섬유강화 복합재료(CFRTP) 리벳 체결 기술을 제안하였다. CFRTP 리벳은 동일한 크기의 알루미늄 리벳과 비교하여 45%의 무게가 경량화 되었으며 내식성, 고강도, 고강성의 특징을 가진다.

CFRTP 리벳은 유도가열 방법을 통해 용융점 이상의 온도로 국부가열하여 체결하였다. 단일 중첩 전단 시편은 타원형의 4회전 코일을 사용하여 220 kHz 주파수 / 4.78 kW 전력으로 유도가열한 결과, CFRTP 리벳이 258℃로 가열되었다. 굽힘 시편은 원통형의 5회전 코일을 사용하여 215 kHz 주파수 / 6.3 kW 전력으로 유도가열한 결과, CFRTP 리벳이 250℃로 가열되었다. 이때 X선 컴퓨터 단층촬영 장치(Micro CT)를 이용하여 체결 부위를 관측한 결과, 체결과 동시에 용융된 고분자 수지가 드릴링에 의한 박리 등의 결함 사이로 주입되면서 보수되었다.

CFRTP 리벳의 기계적 강도를 평가하기 위한 단일 중첩 전단시험 결과, 시편의 인장이 가해짐에 따라 리벳에 전단이 가해져 리벳의 파괴가 발생하였다. CFRTP 리벳이 완전한 체결이 이루어졌을 시 알루미늄 리벳과 비교하여 베어링강도(Bearing strength)가 36% 향상하였다. 굽힘시험 결과, 시편의 굽힘에 따라 리벳에 압축, 인장 및 회전력이 가해져 리벳의 파괴가 발생하였다. CFRTP 리벳의 완전한 체결이 이루어졌을 시 알루미늄 리벳과 비교하여 굴곡강도(Flexural

strength)가 4.5% 저하되었다. 이를 통해 CFRTP 리벳은 알루미늄 리벳과 비교하여 강도가 유사 또는 우수함을 확인하였다.

연구를 통해 유도가열이 가능한 CFRTP 리벳은 경량성, 고강도, 내식성의 특징을 가지며 체결 시 박리를 보수하여 물성 저하 및 부품의 폐기를 방지할 수 있음을 확인하였다. 이러한 장점으로 CFRTP 리벳은 항공기를 포함한 고하중 구조물의 금속 리벳을 대체하여 응용될 수 있다.

참고 문헌

1. Karataş, M.A. and H. Gökkaya, *A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials*. Defence Technology, 2018. **14**(4): p. 318-326.
2. Sudhin, A., et al., *Comparison of properties of carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites for aerospace applications*. Materials today: proceedings, 2020. **24**: p. 453-462.
3. Hegde, S., B.S. Shenoy, and K. Chethan, *Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance*. Materials Today: Proceedings, 2019. **19**: p. 658-662.
4. Kim, K.-S. and S.-J. Park, *Technique status of carbon fibers-reinforced composites for aircrafts*. Elastomers and Composites, 2011. **46**(2): p. 118-124.
5. Wang, C., et al., *Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates*. Composites Part B: Engineering, 2017. **109**: p. 10-22.
6. El-Sonbaty, I., U. Khashaba, and T. Machaly, *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*. Composite structures, 2004. **63**(3-4): p. 329-338.
7. Forintos, N. and T. Czigany, *Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers-A short review*. Composites Part B: Engineering, 2019. **162**: p. 331-343.
8. Gondaliya, R.B., *Improving Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures Subjected to Low Velocity Impact Loading: Experimental and Numerical Analysis*. 2016.
9. Subadra, S.P., P. Giskevicius, and S. Yousef, *Low velocity impact and pseudo-ductile behaviour of carbon/glass/epoxy and carbon/glass/PMMA hybrid composite laminates for aircraft application at service temperature*. Polymer Testing, 2020. **89**: p. 106711.
10. Bhudolia, S.K., et al., *Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: A review*. Materials, 2020. **13**(6): p. 1284.
11. Kausar, A., *Role of thermosetting polymer in structural composite*. Am. J. Polym. Sci. Eng, 2017. **5**(1): p. 1-12.
12. Teplyk, Y., V. Hapon, and M. Tuz, *Thermoplastic materials-a new stage in the life of aircraft construction*. Proceedings of National Aviation University, 2020. **84**(3).
13. Barile, M., et al., *Thermoplastic composites for aerospace applications, in Revolutionizing aircraft materials and processes*. 2020, Springer. p. 87-114.

14. Im, K.-H., et al., *Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates*. Composites Part B: Engineering, 2001. **32**(8): p. 669-682.
15. García-Moreno, I., et al., *Effect of thermal ageing on the impact damage resistance and tolerance of carbon-fibre-reinforced epoxy laminates*. Polymers, 2019. **11**(1): p. 160.
16. Dawei, Z., et al., *Review on joining process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: methods and joining process*. Rare Metal Materials and Engineering, 2018. **47**(12): p. 3686-3696.
17. Jacob, A., *Hexcel ready to fly on the A350 XWB*. Reinforced Plastics, 2013. **57**(3): p. p25-26.
18. Aamir, M., et al., *Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: A review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **105**(5): p. 2289-2308.
19. Abrao, A., et al., *The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite*. Materials & Design, 2008. **29**(2): p. 508-513.
20. Martínez-Landeros, V., et al., *Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **39**: p. 160-166.
21. Pramanik, A., et al., *Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys-A review*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017. **101**: p. 1-29.
22. Fortier, V., J.-E. Brunel, and L. L. Lebel, *Fastening composite structures using braided thermoplastic composite rivets*. Journal of Composite Materials, 2020. **54**(6): p. 801-812.
23. Geier, N., J.P. Davim, and T. Szalay, *Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019. **125**: p. 105552.
24. Feito, N., et al., *Experimental analysis of the influence of drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs*. Materials, 2014. **7**(6): p. 4258-4271.
25. Liu, D., Y. Tang, and W. Cong, *A review of mechanical drilling for composite laminates*. Composite structures, 2012. **94**(4): p. 1265-1279.
26. Khashaba, U., *Drilling of polymer matrix composites: a review*. Journal of composite materials, 2013. **47**(15): p. 1817-1832.
27. Wang, X., et al., *Tool wear of coated drills in drilling CFRP*. Journal of Manufacturing Processes, 2013. **15**(1): p. 127-135.
28. Muddassir, M., M. Duhovic, and M. Gurka, *A comprehensive study of metal-coated short carbon fibers, graphite particles, and hybrid fillers for induction heating*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2020. **33**(3): p. 393-412.
29. Yarlagadda, S., et al., *A study on the induction heating of conductive fiber reinforced composites*. Journal of composite materials, 2002.

- 36(4)**: p. 401–421.
30. Frogner, K., *Industrial Induction Heating—with a focus on multi coil solutions*. 2014.
 31. Becker, S., et al., *Influence of polymer matrix on the induction heating behavior of CFRPC laminates*. *Composites Part B: Engineering*, 2022. **231**: p. 109561.
 32. Rudolf, R., P. Mitschang, and M. Neitzel, *Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000. **31(11)**: p. 1191–1202.
 33. Bayerl, T., R. Schledjewski, and P. Mitschang, *Induction heating of thermoplastic materials by particulate heating promoters*. *Polymers and Polymer Composites*, 2012. **20(4)**: p. 333–342.
 34. Ahmed, T., et al., *Induction welding of thermoplastic composites—an overview*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006. **37(10)**: p. 1638–1651.
 35. Marinho, B., et al., *Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder*. *Powder technology*, 2012. **221**: p. 351–358.
 36. Pokharel, P., et al., *A hierarchical approach for creating electrically conductive network structure in polyurethane nanocomposites using a hybrid of graphene nanoplatelets, carbon black and multi-walled carbon nanotubes*. *Composites Part B: Engineering*, 2019. **161**: p. 169–182.
 37. Pokharel, P., S.H. Lee, and D.S. Lee, *Thermal, mechanical, and electrical properties of graphene nanoplatelet/graphene oxide/polyurethane hybrid nanocomposite*. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2015. **15(1)**: p. 211–214.
 38. Pokharel, P. and Q.-T. Truong, *Multi-step microwave reduction of graphite oxide and its use in the formation of electrically conductive graphene/epoxy composites*. *Composites Part B: Engineering*, 2014. **64**: p. 187–193.
 39. Nassar, A. and E. Nassar, *Effect of fiber orientation on the mechanical properties of multi layers laminate nanocomposites*. *Heliyon*, 2020. **6(1)**: p. e03167.
 40. Kaundal, R., A. Patnaik, and A. Satapathy, *Comparison of the mechanical and thermo-mechanical properties of unfilled and SiC filled short glass polyester composites*. *Silicon*, 2012. **4(3)**: p. 175–188.
 41. Agarwal, G., A. Patnaik, and R.K. Sharma, *Thermo-mechanical properties of silicon carbide filled chopped glass fiber reinforced epoxy composites*. *International journal of Advanced structural Engineering*, 2013. **5(1)**: p. 1–8.
 42. Hasan, E.H., K.M. Shokry, and A.A. Emam, *Study of impact energy and hardness on reinforced polymeric composites*. *Mapan*, 2010. **25(4)**: p. 239–243.
 43. Nassar, A. and E. Nassar, *Thermo and mechanical properties of fine silicon carbide/chopped carbon fiber reinforced epoxy composites*. *Universal journal of mechanical engineering*, 2014. **2(9)**: p. 287–292.

44. Jesuarockiam, N., et al., *Enhanced thermal and dynamic mechanical properties of synthetic/natural hybrid composites with graphene nanoplatelets*. *Polymers*, 2019. **11**(7): p. 1085.
45. Vahedi, F., et al., *Effects of carbon nanotube content on the mechanical and electrical properties of epoxy-based composites*. *New Carbon Materials*, 2014. **29**(6): p. 419-425.
46. Bayerl, T., et al., *The heating of polymer composites by electromagnetic induction—A review*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014. **57**: p. 27-40.
47. Miller, A., *The nature of induction heating in graphite-fiber, polymer-matrix composite materials*. *Sampe Journal*, 1990. **26**(4): p. 37-54.
48. Fink, B.K., R.L. McCullough, and J.W. Gillespie Jr, *A local theory of heating in cross-ply carbon fiber thermoplastic composites by magnetic induction*. *Polymer Engineering & Science*, 1992. **32**(5): p. 357-369.
49. Becker, S. and P. Mitschang. *Influences of textile parameters on the induction heating behavior of CFRPC*. in *21st International Conference on Composite Materials*. 2017.
50. Kim, H., et al., *A study on the induction heating of carbon fiber reinforced thermoplastic composites*. *Advanced Composite Materials*, 2002. **11**(1): p. 71-80.
51. Barroeta Robles, J., et al., *Repair of thermoplastic composites: an overview*. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2022: p. 1-29.
52. Bayazeid, S.M., et al., *Recovery of impact-damaged carbon fiber-reinforced composites using induction heating*. *Journal of Composite Materials*, 2022. **56**(4): p. 605-618.
53. Collinson, M., et al., *Novel composite curing methods for sustainable manufacture: A review*. *Composites Part C: Open Access*, 2022: p. 100293.
54. D/DM-13, A. *Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates*. in *Am Soc Test Mater*. 2013.
55. ASTM, S., *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790*. Annual book of ASTM Standards, 1997.
56. Ma, Y., et al., *A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites*. *Composite Structures*, 2017. **160**: p. 89-99.
57. Ma, Y., et al., *A study on the failure behavior and mechanical properties of unidirectional fiber reinforced thermosetting and thermoplastic composites*. *Composites Part B: Engineering*, 2016. **99**: p. 162-172.

Abstract

Repairment of delamination and
increase of fastening strength
using induction heating of CFRT
rivet

Jung Injun

Department of Materials Science and Engineering

Hybrid Materials Major

The Graduate School

Seoul National University

Carbon fiber reinforced plastic(CFRP) is used in various fields such as construction and civil engineering, aircraft, automobiles, and wind power generators due to its advantages such as light weight, high strength, high stiffness, fatigue characteristics, and corrosion resistance. In particular, CFRP is replacing metal parts such as wings, horizontal and vertical stabilizers of aircraft. However, due to the high price of composite materials and the difficulty of manufacturing, it is impossible to manufacture an aircraft with a single component, and

the aircraft is manufactured through the bonding of numerous components. The aircraft is assembled using metal fastening parts such as bolts or rivets. Metal fastening parts increase the weight of the aircraft, have the possibility of corrosion when exposed to a moisture environment, and become dimensionally unstable at high temperatures due to their different coefficients of thermal expansion from carbon fiber reinforced composites. In addition, defects due to drilling occur when processing fastening holes for inserting fastening parts.

In this study, to solve this problem, a carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) rivet was developed. CFRTP rivets replaced metal rivets to solve the disadvantages of metal fastening parts, and aimed to repair delamination by drilling and increase fastening strength. For the fastening of the CFRTP rivet, induction heating was performed under high-frequency conditions to a temperature above the melting point, and fastening was performed through the flow of the melted polymer resin, consolidation, and cooling. At this time, when fastening, the melted polymer resin is injected between delamination by drilling and repaired. In addition, in order to evaluate the mechanical strength of CFRTP rivets, physical properties were evaluated by comparing with aluminum rivets.

As a result of drilling of the fiber-reinforced composite laminate, defects such as surface cracks, fiber pull-out, cracks, and delamination were observed at the exit of the fastening hole and the

cutting surface through which the drill penetrated. At the same time as fastening, in order to repair defects caused by drilling, CFRTP rivets were induction-heated to a temperature above the melting point by changing power under high-frequency conditions of 215 ~ 220 kHz. The CFRTP rivets heated to a temperature above the melting point through induction heating were fastened, and melted resin was injected between the defects including delamination to repair them. In addition, as a result of evaluating the mechanical properties of CFRTP rivets, they showed similar or higher properties compared to aluminum rivets.

Through this, it was confirmed that the developed CFRTP rivet, which is capable of induction heating, replaces metal rivets and has advantages such as light weight, high strength, high stiffness, and corrosion resistance, and can prevent deterioration of physical properties and scrapping of parts by repairing delamination.

Keywords : Carbon fiber reinforced plastic, Mechanical fastening, induction heating, Delamination repairment, Increase of fastening strength

Student Number : 2021-20204