

복합재료 설계 및 제조 그리고 디지털 전환



안현철

- 2008. 서울대학교 재료공학부 학사
- 2010. 서울대학교 재료공학부 석사
- 2016. 서울대학교 재료공학부 박사
- 2019. The Ohio State University(USA) 박사후 연구원
- 2022. 한국생산기술연구원 섬유연구부문 박사후 연구원
- 2023-현재. 영남대학교 공과대학 파이버시스템공학과 조교수

1. 서 론

복합재료(composite materials)는 두 개 이상의 서로 다른 물질이 조합되어, 각 구성 요소의 특성을 유지하면서도 새로운 또는 강화된 기계적, 물리적 성질을 나타내는 재료이다. 현대 기술 발전에 있어, 경량화, 고강도화, 내구성 향상 등 물성적 측면과 아울러, 친환경 탄소제로의 입장에서 경량화를 통한 효율성을 제고하는 측면에서 널리 활용되고 있다. 이와 같이 복합재료는 주로 항공·우주, 자동차, 스포츠, 레저, 건축, 토목, 의료 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 각 분야에서 핵심 소재로 용도가 확대되고 있어, 지속적인 성장이 가능한 소재이다. 이 중 가장 큰 분야를 차지하고 있는 섬유 강화 복합재료는 섬유 형태의 강화재와 이를 결합하고 하중을 전달하는 역할을 하는 기지재로 이루어져 있으며, 탄소섬유 강화 복합재료(CFRP)를 비롯하여 다양한 섬유 소재를 활용한 복합재료가 연구 및 제조 활용되고 있으며, 특히 경량화를 위한 섬유 강화 복합재료 구조가 많이 활용되고 있다.

항공·우주 산업의 경우 최근 생산되는 항공기는 대부분 절반 이상을 탄소섬유 강화 복합재료를 동체 및 날개 구조에 활용하고 있으며, 우주 산업에서는 내열 세라믹 복합재료를 이용한 방열 시스템 설계에도 활용하고 있다(Figure 1). 자동차 및 스포츠 산업에서 보면, 자동차에서는 경량화를 위한 복합재 구조 및 패널, 스포츠 산업에

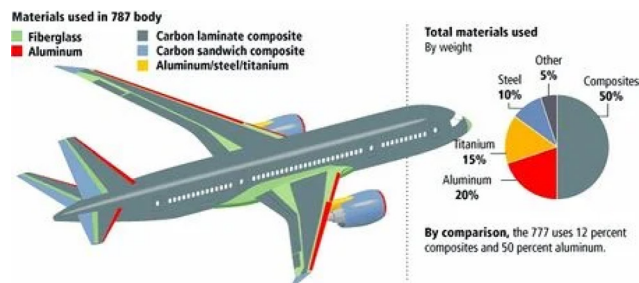


Figure 1. 보잉 787 항공기의 복합재료 활용[1].

서는 골프채, 테니스 라켓 등 스포츠용품과 자전거 프레임 등에서 어렵지 않게 탄소섬유 복합재료로 제조된 제품을 접할 수 있다. 또한, 복합재료는 내구성 및 내수성이 우수하여 건축 및 토목 산업에서 보강재 및 친환경 고강도 경량 패널로 활용되고 있으며, 선박에서도 방산 및 레저용 선박에서 고강도 경량 구조로 활용되고 있다.

이와 같은 섬유 강화 복합재료는 본지에서도 다양한 분야 및 첨단 산업 응용으로 소개되었기에, 본 총설에서는 이와 같은 섬유 강화 복합재료의 설계와 제조의 관점에서 기초적이고 핵심적인 내용을 정리하고자 한다. 또한, 최근 Industry 4.0 아래 다양한 분야에서 활용하고 있으며, 복합재료에서도 예외가 아닌 디지털 전환(digital transformation)과 디지털트윈(digital twin)에 대해서도 간략하게 살펴보고자 한다.

2. 복합재료 설계

2.1. 복합재료의 기본 개념

복합재료는 크게 강화재(reinforcement)와 기지재(matrix)로 구성된다. 강화재는 여러 가지 형태가 가능하며, 주로 섬유 또는 입자의 형태로 존재하며 복합재료의 강도 및 강성을 증가시키는 역할을 한다. 기지재는 고분자, 금속, 세라믹 등 여러 소재가 가능하며, 강화재를 결합하고 보호하며, 하중을 전달하는 역할을 한다. 이와 같은 복합재료는 사용되는 재료의 종류와 구조에 따라 분류할 수 있으며, 먼저 강화재의 구조에 따라 Figure 2와 같이 구분할 수 있고, 크게 입자 강화 복합재와 섬유 강화 복합재로 나눌 수 있다. 섬유(fiber) 강화 복합재료는 연속적인 섬유나 단섬유를 강화재로 활용한 복합재료이고, 입자(particle)

강화 복합재료는 복합재료 기지재 내부에 입자를 넣어서 물리적 또는 화학적 성질을 강화한 복합재료이다. 이외에도 적층(laminar) 복합재료는 여러 층 형태로 적층되어 구성된 복합재료이며, 플레이크(flake) 복합재료는 복합재 내부에 얇은 층 형태의 소재를 넣어 보강한 복합재료이며, 충전(filled) 복합재료는 충전재(filler)를 수지에 주입해서 제조한 복합재료이다. 다만, 이와 같은 복합재료의 구분은 단순히 구분되지 않는 경우도 많으며, 여러 가지 형태를 복합해서 활용하기도 한다. 특히 적층 복합재의 경우 다른 여러 복합재 형태를 적층해서 사용하는 경우가 많다.

여기서는 섬유 강화 복합재료를 주로 다루기로 한다. 섬유 강화 복합재료는 다시 크게 연속 섬유와 단섬유 형태로 구분할 수 있으며, 다양한 형태의 섬유 소재를 활용한다. 탄소섬유를 예로 들면, Figure 3과 같이 여러 형태의 탄소섬유가 활용되며, 주로 활용되는 탄소섬유 복합재료는 시트 형태의 적층 복합재를 구성하기 위해 탄소섬유 토우를 한 방향으로 배열한 일축 복합재나 직물 형태를 적층한 직물 복합재가 가장 많이 활용되고 있다.

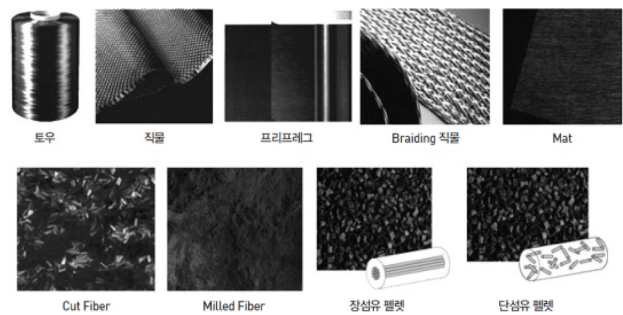


Figure 3. 복합재료에 활용되는 다양한 형태의 탄소섬유 구조.

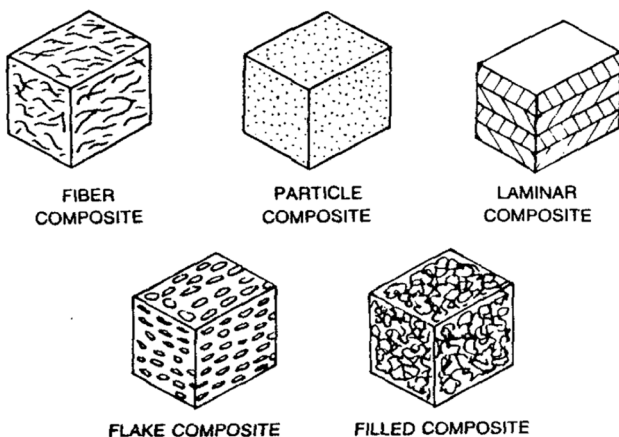


Figure 2. 복합재료 형태의 종류[2].

복합재료를 기지 재료에 따라서는 다음과 같이 분류한다.

- 고분자 기지 복합재료(PMC, polymer matrix composite): 가장 많이 활용되는 복합재료 형태로 최근 활용되는 탄소섬유 강화 복합재료 등 대부분의 섬유 강화 복합재료에 활용되는 형태이다. 주로 사용되는 섬유 소재는 탄소섬유, 유리 섬유, 아라미드 섬유 등 다양한 고성능 섬유가 있으며, 사용되는 기지재는 크게 열가소성 수지와 열경화성 수지로 분류된다. 열가소성 수지는 열을 가하여 성형한 뒤에도 다시 열을 가하면 형태를 변형시킬 수 있는 소재로, 일반적으로 가볍고, 내충격성이 좋으며, 여러 성형 공정에 활용할 수 있으나, 용융 상태에서 활용하는 특징상 수지 함침성 및 성형 속도에 한계가 있으며, 그 특성으로 내열성에 한계를 가지고 있다. 폴리에틸렌, 폴리프로필렌,

폴리스타이렌, 폴리카보네이트, 폴리 부틸렌 테레프탈레이트 등이 열가소성 소재로 주로 활용되고 있다. 열경화성 소재는 이와 반대로 한 번 경화가 되면 다시 열을 가해도 형태가 변하지 않는 소재로 수지에 주로 가교결합을 통한 경화 과정을 거쳐 제조한다. 일반적으로 열가소성 소재에 비해 내열성, 내약품성, 기계적 성질이 좋고 단량체와 경화제의 조합으로 활용되는 만큼 성형성 및 성형 속도에 장점을 가지고 있어 현재 섬유 강화 복합재료는 열경화성 소재를 주로 활용하고 있다. 에폭시, 불포화 폴리에스터 등이 주로 활용되고 있다. 다만 최근에는 친환경 및 재활용 트렌드에 맞춰 열가소성 소재를 활용한 복합소재 연구가 많이 진행되고 있다. 고분자 복합소재의 특성상 가볍고 가공에 용이하기 때문에 구조물이나 차체, 스포츠용품 등 주변에서 흔히 볼 수 있는 다양한 복합소재에 활용되고 있다.

- 금속 기지 복합재료(MMC, metal matrix composite): 금속 소재를 기반으로 하는 복합재료로 주로 알루미늄, 티타늄 등의 소재를 기지재로 제조되는 복합재료이다. 고분자 대비 높은 강도와 내열성을 가지며, 우수한 내마모성을 가지고 있다. 사용되는 강화 섬유 역시 이와 같은 물성을 만족하는 SiC 등 고내열·고성능 섬유가 주로 활용되며, 복잡한 제조 공정 및 고비용으로 인해 항공우주, 엔진 구성 요소, 방산 등 한정된 소재로 주로 활용되고 있다.

- 세라믹 기지 복합재료(CMC, ceramic matrix composite): 금속 기지 복합재료와 흡사하게 세라믹 소재를 기지재로 활용하기 때문에, 뛰어난 내열성과 강도, 내산화성을 가지고 있는 복합재료이다. 금속 소재가 고강도·내열성을 가지고 있으나 금속의 특성상 산화성의 한계가 있어, SiC, 알루미늄, 지르코니아 등을 활용하여 우수한 내산화성을 보강한 소재이다. MMC와 동일하게 제조 공정과 비용적인 한계가 있어 고성능이 요구되는 항공우주 소재, 터빈 블레이드, 고열 방열재 등에 주로 활용된다.

2.2. 복합재료의 설계

복합재료의 설계는 응용 분야에 따라 기계적 성질, 환경적 요인, 제조 공정을 고려하여 진행된다. 특히 섬유 강화 복합재료는 구조재로 많이 활용되며, 기계적 물성을 많이 필요로 하는 구조재의 특성상 인장강도, 압축강도, 충격 저항성 등의 요구 특성을 고려하여 설계한다. 또한, 사용 환경적인 요인으로 온도 변화, 습도, 화학적 내성을 고려하며, 앞서 소개한 MMC, CMC 등이 이와 같은 특성을 좀 더 고려해야 하는 복합재료이다. 내구적인 측면에서 사용 환경도 설계의 주요 조건이며, 단순 인장 압축의 사용 조건인지, 굽힘이나 피로 하중을 받는 조건인지 역

시 중요한 요소이다. 특히 주로 사용되는 적층 복합재의 경우 인장 특성은 설계 및 예측하기 어렵지 않으나, 굽힘을 받는 구조일 경우, 전단 특성이나 비틀림 하중은 중요 인자로 고려하여야 하며, 적층 복합재가 가지는 층간 분리 또는 층간 전단에 대한 특성을 고려해야 한다.

물성적인 측면이 위와 같다면 복합재료의 설계에 있어 제조 가능성과 경제성 역시 설계의 중요 요소이다. 복합재료의 강화재로 활용되는 섬유는 다양한 고성능, 고기능성 섬유가 있으며, 이를 사용 가능한 공정인지, 또한 기지재와 결합이 충분한 조건인지 또한 살펴봐야 한다. 특히 MMC나 CMC의 경우 PMC의 주요 고분자 기지재 소재와 다르게 섬유와 계면 결합성이 떨어지거나 열팽창 계수의 차이, 균열 성장 메커니즘을 고려해서 설계를 진행해야 한다. 경제성 측면에서 보면 섬유 강화 복합재료, 특히 연속 섬유 강화 복합재료의 경우 가공 및 유지보수 비용 역시 고려해야 할 대상이다. 일반적으로 부분적인 유지보수가 가능한 단일 소재와 달리, 섬유 강화 복합재료의 경우 섬유 구조에 영향을 받으면 부분적인 유지보수가 불가능한 경우가 많아, 그 물성은 뛰어나나 유지보수 측면에서 비용 분석이 필요한 경우가 많다.

적층 섬유 강화 복합재료의 기본적인 설계 요소는 아래 Figure 4와 같다. 가장 기본적인 요소로 강화제인 섬유의 함량을 생각할 수 있으며, 동일한 섬유 함량이라도 섬유 가닥의 크기와 형상 역시 설계 대상이 될 수 있다. 그러나 대부분의 상용 섬유 소재는 일반적으로 정해진 형상과 규격을 가지고 있으므로, 주요 설계 요소는 섬유의 종류, 섬유의 함량, 섬유의 분포와 배향(각도)의 선정이 중요한 요소로 작용하게 된다.

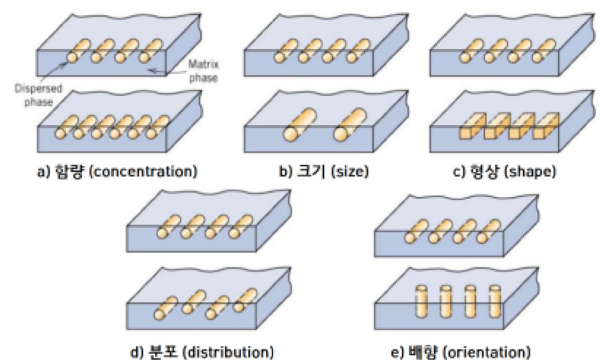


Figure 4. 적층 섬유 강화 복합재료의 기본 설계 요소[3].

가장 많이 활용되는 적층 복합재는 섬유 방향을 조절하여 성능을 최적화하는 기법이며, 대표적인 적층 방법은 단방향 적층

(unidirectional laminate), 직교 적층(cross-ply laminate), 대칭 적층(symmetric laminate), 균형 적층(balanced laminate) 등이 있다. 이와 같은 적층 복합재는 앞서 소개한 바와 같이 기본적으로 층간 전단 파손이나 계면 분리의 근본적인 약점을 가지고 있으며, 적층 복합재의 이와 같은 한계를 극복하기 위해 적층 복합재에도 3차원 구조 설계를 진행하고 있으며, 두께 방향의 섬유 배향과 보강을 고려한 3차원 직조 구조가 대표적인 구조 설계 방법으로 볼 수 있다. 내구성과 피로 물성이 중요한 블레이드 등에서 다양하게 연구 활용되고 있다.

... 3D weaving

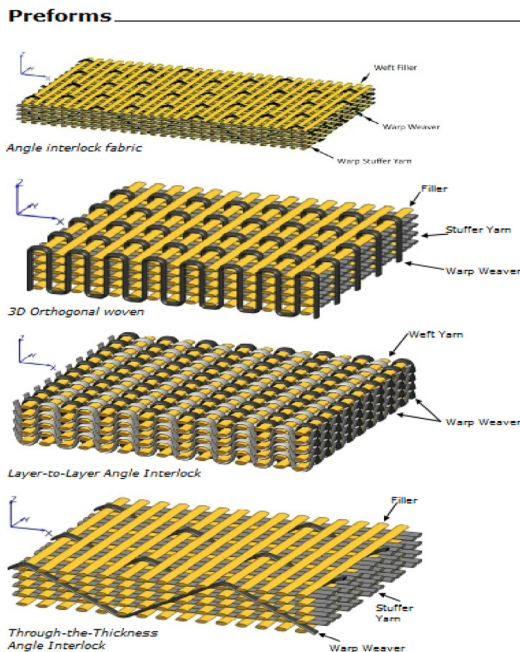


Figure 5. 3차원 직조 구조의 예시[4].

3. 복합재료 제조

복합재료의 제조에는 여러 가지 공정이 있는데 크게 고분자 기지재의 경우와 금속 및 세라믹 기지재로 분류할 수 있다. 기지재 소재의 특성상 고분자 기지재의 경우 수지의 흐름성을 가지고 도포하거나 수지 이송을 통해 성형이 가능하나 금속 또는 세라믹 소재의 경우 이와 같은 수지 도포 및 이송이 제한적이기 때문에, 주로 용융 침투법이나 분말 야금법을 통해서 복합재료를 제조한다.

금속 또는 세라믹 기지 복합재료의 주요 제조 방법인 용융 침투법의 경우, 용융 금속을 다공성 강화재에 침투시켜 제조하는

공정으로 소재의 특성상 고온의 공정이 요구되고 강화 소재가 내열성이 충분히 보장되어야 한다. 다른 주요 제조 공정인 분말 야금법은 분말 형태의 금속 또는 세라믹을 혼합하여 소결을 통해 복합재료를 제조하는 것으로 역시 고온, 고압 공정이 필요하기 때문에 이에 적합한 강화재로 제조해야 한다. 대부분 금속 또는 세라믹 복합재료가 내열 소재 제조에 활용하고 있으므로 이와 같은 공정의 활용이 가능하며, 그 외에도 스프레이 코팅법 등 기지재의 특성에 맞는 제조 공정이 있다.

섬유 강화 복합재료에서 주로 다루는 고분자 기지 복합재료의 경우 금속이나 세라믹과 달리 일반적으로 기지재의 흐름성과 함침성이 좋고 고온의 공정이 필수적이지 않기 때문에 수지 도포나 이송을 기본으로 다양한 성형공법이 활용되고 있다. 주요 공법으로는 핸드 레이업(hand lay-up), 진공백 성형(vacuum bagging), 압축성형(compression molding), 수지 이송 성형(resin transfer molding), 오토클레이브 성형(autoclave molding) 등이 있다.

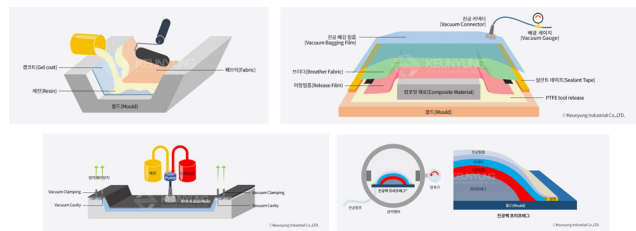


Figure 6. 대표적인 성형공법. 1) 핸드 레이업 2) 진공백 성형 3) 수지 이송 성형 4) 오토클레이브 성형[5].

가장 전통적인 방법인 핸드 레이업과 여러 부품 성형에 활용되는 진공백 성형은 주로 열경화성 수지가 일부 경화되어 섬유에 결합되어 있는 프리프레그 상태를 활용한다. 전통적인 방법인 핸드 레이업은 공정 특성상 균일성에 한계가 있고, 내부 기포나 결함이 발생할 가능성이 크다. 진공백 성형 역시 생산 속도가 느리고 균일성에서 한계가 있으나, 현재에도 다양한 소량 생산 체계에서 활용되고 있다. 특히 진공백 성형의 경우 수작업에서 발생할 수 있는 기포 발생과 수지 과잉 등을 방지할 수 있어, 고품질이 요구되거나 복잡한 구조의 복합재 부품 제조 공정에서 다양하게 활용되고 있다. 진공백 구조는 수지 이송 성형이나 오토클레이브 공정에서도 활용되거나 수지를 미리 함침 시키거나 프리프레그를 활용한 오픈 몰드 공정을 가리킨다.

압축성형은 열경화성 수지와 열가소성 수지 모두에서 활용되는 가장 많이 활용되는 성형법으로 고분자 수지를 금형에 넣고 열과 압력을 가하여 성형을 진행한다. 대량 생산에 용이하고 생

산 속도가 빠른 장점이 있으나, 열과 압력이 가해지는 공정의 특성상 공정이 섬유 구조에 영향을 미칠 수 있어 주로 단섬유 복합재료나 시트 몰딩 컴파운드(SMC) 등에서 많이 사용되고 있지만 모든 섬유 강화 복합재료 공정에 활용할 수 있는 공법이다.

수지 이송 성형은 수지가 포함되어 있지 않은 프리폼(preform) 상태의 섬유 구조를 금형에 적재한 후 수지를 주입해 성형하는 공정이다. 촉매나 경화제가 들어 있는 액체 수지가 금형 내부를 채우고 금형 내부의 공기는 통기구를 통해 빠져나와 섬유를 수지에 함침 시키고 경화되어 복합재를 제조한다. 경화 조건에 따라 온도 조건을 조절할 수 있으며, 원하는 형태의 프리폼 형태와 섬유 구조를 활용할 수 있는 장점이 있으며, 수지 이송 공정을 진공으로 보조하는 진공 보조 수지 이송 성형(vacuum assisted resin transfer molding)도 많이 활용되고 있다. 이와 같은 수지 이송 성형은 수지 이송 및 경화 조건의 변수가 많고 공정 속도의 한계가 있으나, 낮은 공정비용과 간단한 금형 자유도 및 다양한 구조에 활용할 수 있으며, 내부에 삽입물이나 보강재를 두고 성형을 진행할 수 있는 장점이 있어 다양한 분야에 활용되고 있다.

오토클레이브 성형은 프리프레그 또는 레진에 함침된 소재를 가압 챔버에 넣고 온도와 압력을 높여 성형을 진행하며, 균일하게 높은 온도와 압력에서 공정을 진행하기에 수지가 최대한 균일하게 침투하여 기공 및 결함 발생을 최소화할 수 있는 공정이다. 주로 고온 및 고압 경화가 가능한 열경화성 수지를 활용해서 복합재를 제조하며, 내열성과 내충격성 등 고성능 고강도 제품이 필요한 고성능 고신뢰성 제품을 제조하는 데 최적화된 공정이나 가압 챔버의 초기 설치, 유지보수, 공정비용이 비싸고, 제조 공정이 매우 긴 단점이 있어서 고부가 소량 생산에 활용되고 있다. 또한 가압 챔버를 사용하는 공정의 특성상 제조되는 부품 크기의 제한이 큰 단점이다.

그 외에도 압력 용기류 제작에 용이한 필라멘트 와인딩(filament winding), 일정한 단면을 가지는 연속 성형에 유용한 인발 성형(pultrusion)이나 사출 성형(extrusion) 등의 제조 공정도 활용되고 있으며, 산업적으로는 저 섬유분율 고속 대량생산이 가능한 시트 몰딩 컴파운드(sheet molding compound)나 벌크 몰딩 컴파운드(bulk molding compound) 공정 역시 활용되고 있다.

4. 복합재료 디지털 전환

최근 Industry 4.0 아래 디지털 전환(digital transformation)과

디지털트윈(digital twin) 기술은 복합재료 산업에서도 중요한 역할을 하고 있다. 디지털 전환은 데이터, 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT) 등의 디지털 기술을 활용하여 기존의 제조·설계 방식과 비즈니스 프로세스를 혁신하는 것을 의미한다. 복합재료 산업에서도 이러한 디지털 기술을 활용하여 설계 최적화, 제조 공정 자동화, 품질 관리 개선, 유지보수 예측 등의 혁신이 이루어지고 있다. 디지털트윈은 실제 물리 시스템을 가상 환경에서 동일하게 재현하여, 설계, 제조, 운영, 유지보수를 최적화하는 기술이다. 복합재료 산업에서도 디지털트윈을 활용하여 설계-제조-운영 전반에서의 효율성을 높이고 있다.

4.1. 복합재료 설계의 디지털 전환

복합재료 설계에서의 디지털 전환은 AI 기반 최적 설계 및 해석 시뮬레이션을 이용한 특성을 예측하고 검증하는 공정으로 활용되고 있다. 전통적으로 복합재료는 실험적 접근을 통해 최적 설계를 도출했으나, AI 및 머신러닝 기법을 활용하여 재료 조성 및 적층 구조의 최적화가 가능해짐에 따라 AI 기반 최적 설계를 진행하고 있다. 또한 해석 시뮬레이션 및 예측 모델을 통해 물리 실험 없이도 강도, 내구성, 피로 수명을 분석하고 최적의 복합재료 배합을 자동 도출할 수 있으며, 이를 통해 물리적 실험 비용을 절감하고 개발 속도를 높일 수 있는 장점이 있다.

4.2. 복합재료 제조의 디지털 전환

제조 공정에서의 디지털 전환은 IoT 기반 스마트 공장(smart factory)을 통해 구현되고 있다. 복합재료 제조 과정에서 센서 데이터를 실시간으로 수집하여 온도, 압력, 습도 등의 공정 변수를 최적화하며, 기존의 진공 성형, 오토클레이브 공정 등에서 실시간 모니터링을 통해 불량률의 최소화를 진행하고 있다. 또한 전통적으로 수작업이 많이 필요했던 적층 및 성형 공정

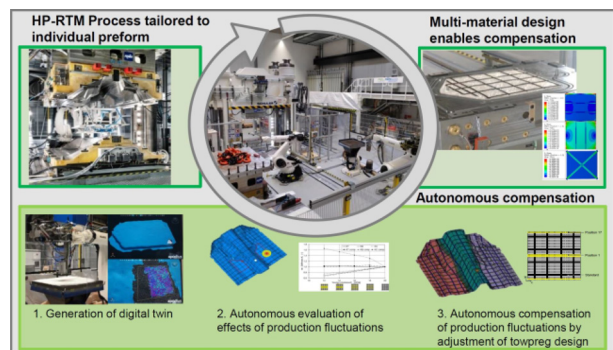


Figure 7. HP-RTM 스마트 팩토리 적용 예시[6].

을 로봇 시스템으로 자동화하여 생산성 향상 및 품질 균일성 확보가 가능하며, 최근 들어 로봇 시스템의 발전은 3차원 구조의 복합재 제조 공정 자동화도 진행하고 있다. 적층 복합재 분야에서는 CFRP 적층 공정에서 로봇을 이용한 자동 테이프 적층(automated tape laying, ATL) 및 자동 섬유 배치(automated fiber placement, AFP) 기술이 활용되고 있다.

제조 공정뿐만 아니라 품질 관리에서도 디지털 전환이 활용되고 있으며, 비파괴 검사(NDT, non-destructive testing)인 초음파, 적외선 열화상, X-ray 등을 활용하여 복합재료 내부 결함을 비파괴적으로 검사하고 자동화를 통해 검사 속도를 높이고 AI 기반 이미지 분석을 적용하여 결함 탐지 정확도를 향상할 수 있다. 디지털 기반 예측 기술을 기반으로 제조 데이터와 센서 데이터를 활용하여, 복합재 부품의 잔여 수명(RUL, remaining useful life)을 예측하고, 유지보수 주기를 최적화할 수도 있다. 예를 들어, 항공기 복합재 부품의 피로 상태를 실시간 모니터링하여 사전 정보를 진행하고 유지보수 및 사고를 최소화할 수 있다.

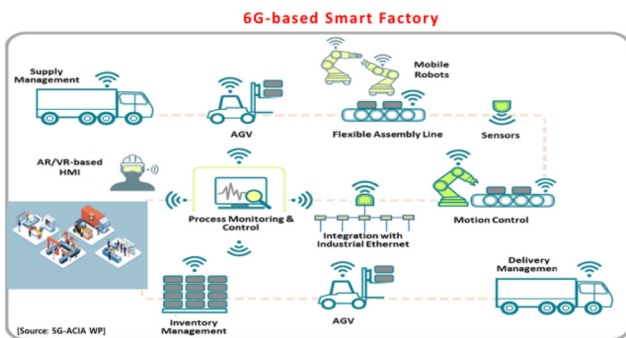


Figure 8. Industry 4.0 활용을 위한 6G IoT 기반 스마트 팩토리 모식도 예시[7].

4.3. 복합재료 설계 및 제조에서의 디지털트윈

디지털트윈은 실제 부품인 물리적 자산(physical asset), 물리적 자산의 시뮬레이션 모델인 가상 모델(virtual model), 센서 및 IoT 데이터를 기반으로 한 동기화 실시간 데이터(real-time data)로 구성된다. 디지털트윈은 이를 활용하여 실제 제품의 동작을 가상 환경에서 예측하고 최적화하는 기술이다.

복합재료에서 디지털트윈은 부품 설계 및 제조 공정, 유지보수에서 활용될 수 있다. 디지털트윈은 디지털 전환과 연결되는 부분으로 복합재료 부품 설계에서는 복합재 부품을 제작하기 전, 디지털트윈을 활용하여 다양한 하중 조건에서의 성능을 예측할 수 있다. 디지털 전환의 AI 기반의 설계 자동화를 적용하여, 반복적인 시뮬레이션을 통해 최적의 적층 방향 및 재료 조

합을 도출하여 설계 최적화를 진행할 수 있다. 제조 공정 최적화에서도 오토클레이브 성형, RTM, 핸드 레이업 등의 제조 공정을 디지털 환경에서 시뮬레이션하여 공정 최적화를 수행할 수 있다. 또한 제조 과정에서 발생할 수 있는 결함(기포, 레진 분포 불균형 등)을 사전에 예측하고 방지할 수 있다. 유지보수 측면에서도 실시간 모니터링을 통한 상태 모니터링 및 수명 예측이 가능하며, 부품 내부의 센서를 통해 실시간 데이터를 수집하고 상태를 예측할 수 있다. 예를 들어 피로 모니터링이 중요한 항공기, 터빈 블레이드 등 복합재 부품의 실시간 모니터링을 통해 예방 정비를 진행할 수 있으며, 디지털트윈을 활용하여 최적의 유지보수 방법을 시뮬레이션할 수도 있다.

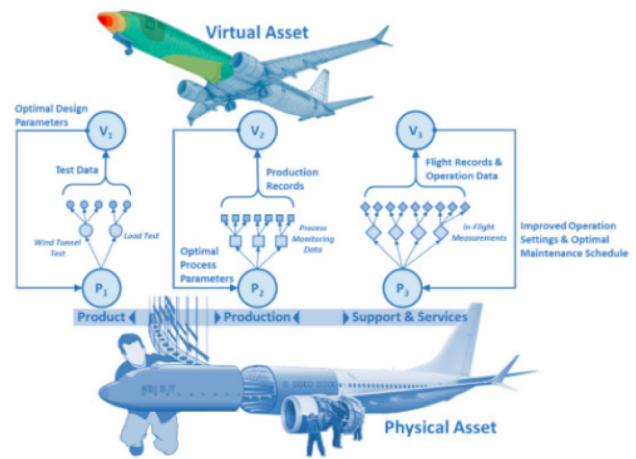


Figure 9. 항공기 적용 디지털트윈 예시[8].

4.4. 복합재료 디지털 전환과 디지털트윈의 전망

디지털 전환과 디지털트윈 기술은 복합재료의 친환경성과 지속 가능성을 높이는 데 중요한 역할을 할 것이다. 기존 복합재료는 재활용이 어렵고, 제조 과정에서 탄소 배출이 많다는 단점이 있다. 미래에는 디지털 기술을 활용하여 재활용 가능한 복합재료, 바이오 기반 복합재료, 저탄소 제조 공정 등이 더욱 발전할 것으로 예상된다. 지속 가능성 측면에서 최적의 친환경 복합재료 조합 설계를 진행할 것이며, 제조 공정 최적화에서 불필요한 에너지 소비와 원료 낭비를 최소화하고, 제조 공정에서의 탄소 배출을 실시간 모니터링하여 탄소 중립 시스템을 구축하는데 역시 활용 가능할 것이다. 또한 블록체인 기반 추적 시스템 역시 연구가 되고 있다. 블록체인을 활용한 재료 및 부품 이력 추적 관리 시스템을 구축하여 자동 인증 및 품질 관리 효율화도 구축할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결 론

복합재료는 높은 강도 대 중량비, 우수한 내구성 및 다양한 설계 자유도를 제공하여 다양한 산업에서 활용되고 있다. 특히, 설계 최적화와 제조 기술 발전을 통해 복합재료의 성능과 경제성이 더욱 향상되고 있다. 향후 연구는 복합재료의 친환경성 및 재활용 기술 개발에 중점을 두어야 하며, 스마트 복합재료와 같은 차세대 기술도 주목할 필요가 있다. 또한 복합재료 산업에서의 디지털 전환과 디지털트윈 기술은 설계 최적화, 제조 자동화, 품질 향상, 유지보수 효율성 증가라는 측면에서 큰 혁신을 가져오고 있다. 특히, AI 기반 설계 최적화, IoT 센서를 활용한 실시간 모니터링, 디지털트윈을 통한 유지보수 예측이 주요 트렌드로 자리 잡고 있다. 앞으로는 이러한 디지털 기술을 적극 활용하여 더 가볍고, 강하고, 지속 가능하고, 지능적인 복합재료를 빠르고 경제적으로 생산하는 시대가 열릴 것으로 예상된다.

참고문헌

1. <https://www.appropedia.org/> (Accessed February 12, 2025)
2. D. Ozkan, M. S. Gok, and A. C. Karaoglanli, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability in Engineering Design Applications III. Andreas Öchsner, Holm Altenbach (Editor), Springer, 2020, pp. 235–253.
3. D. W. Callister et al., Materials science and engineering: An introduction, 7th Ed., John Wiley & Sons, New York, 2007.
4. <http://www.axis-composites.com/> (Accessed February 12, 2025)
5. <https://www.keunying.com/> (Accessed February 12, 2025)
6. <https://www.compositesworld.com/> (Accessed February 12, 2025)
7. S. R. Pokhrel, “Learning from data streams for automation and orchestration of 6G industrial IoT: toward a semantic communication framework”, *Neural Comput & Applic*, 2022, 34, 15197-15206.
8. Digital Twin: Definition & Value, AIAA & AIA, Reston, VA, USA, 2020.