

'26.01.05~26.01.11. 글로벌 탄소산업 주요 동향

□ 영국 Hill Helicopters, 일회성 압축 성형 기술을 통해 주 로터 블레이드 오버홀 간격 20,000시간까지 연장 가능(26.01.05.)

※ [Composites World] Hill Helicopters는 강성 및 질량 분포 최적화를 위해 새로운 단일 경화 제조 공정을 사용하여 복합소재 메인 로터 블레이드 설계/ News

- <https://www.compositesworld.com/articles/one-shot-compression-molding-enables-main-rotor-blades-that-achieve-20000-hours-between-overhauls>
- #영국 #항공우주 #탄소섬유 #유리섬유 #복합소재 #프로세스 #압축 성형 #설계 및 툴링 #금형/공구
- 저자 : 스투어트 미첼, 기고 작가

- 헬리콥터 주 로터 블레이드는 복합 재료 분야에서 특이한 위치를 차지한다. 비교적 깨끗한 공기 중에서 회전하는 풍력 터빈 블레이드나 안정적인 하중을 받는 항공기 날개와는 달리, 헬리콥터 로터 블레이드는 지속적으로 가혹한 공기역학적 환경에서 작동한다.
- 각 블레이드는 로터가 공기를 가르며 회전할 때 발생하는 급격한 기압 변화로 인해 난류 후류를 생성한다. 이 후류는 와류, 압력 변동 및 속도 기울기를 포함하는 교란된 공기 흐름장의 소용돌이치는 기둥 형태이며, 다음 블레이드가 도달하기 전까지 소멸되지 않는다. 따라서 각 블레이드는 이전 블레이드가 남긴 난류 흐름장을 뚫고 나아가야 하며, 로터 디스크 영역 전체에 걸쳐 극적으로 변화하는 비선형 하중을 받게 된다.
- 블레이드와 와류의 상호작용은 힘의 주파수를 발생시키는데, 구조 설계에서 이를 보정하지 않으면 블레이드의 고유 구조 주파수와 결합하여 피로 누적을 가속화하는 공진 조건을 만들어낼 수 있다. 방향성 강성 특성을 지닌 복합재 구조물은 이러한 안전하고 역동적인 거동을 구현하기 위해 정교한 엔지니어링이 필요하다.
- 이러한 설계상의 어려움은 제조 공정의 복잡성으로 인해 더욱 가중된다. 복합재 로터 블레이드는 전통적으로 여러 단계의 조립 공정을 거쳐 제조된다. 별도로 제조된 스파를 스킨에 접착하고, 폼 코어를 접착제로 부착한 후, 마지막으로 침식 방지판을 기계적으로 고정한다. 각 접착면에서 강성 분포와 질량 특성에 변동성이 발생할 수 있는데, 이는 동적 응답 특성을 결정하는 핵심 요소이다.
- 구조물의 경우, 허용 가능한 수명을 확보하기 위해 고유 진동수를 좁은 안전 범위 내에 유지하는 것이 매우 중요한데, 제조 과정에서 발생하는 변동성은 엔지니어링 마진을 크게 제한하여 궁극적으로 수명이나 작동 성능 등 잠재적인 성능을 저하

시킨다.

- Hill Helicopters(영국 스태퍼드)는 HX50 헬리콥터 개발에 있어, 최고 속도 140노트, 정비 주기 20,000시간(TBO), 하루 12개 로터 생산, 그리고 동급 최고 수준의 부드러운 비행 성능이라는 목표를 달성하기 위해 메인 로터에 복합소재를 사용하는 것이 필수적이었다. 그러나 복합소재 로터 블레이드의 다단계 조립 공정으로 인한 잠재적인 변동성 때문에 힐은 HX50에 다른 방식을 적용했다. 바로 단일 경화 공정으로 블레이드 구조 전체를 제작하는 원샷 압축 성형 공정을 개발한 것이다.
- 레이어 케이크를 굽는 것과 수플레를 만드는 것과 비교해 보면, 전통적인 방식은 재료를 섞고, 굽고, 쌓고, 프로스팅하는 과정을 반복하며 복잡성을 더해간다.
- 반면 원샷 방식은 수플레와 같다. 모든 재료를 한 번에 넣고, 레시피와 타이밍만 잘 맞춘다면 나중에 다시 조립할 수 없는 완벽한 결과물을 만들어낼 수 있다. 이 제조 기술은 적층 순서와 구조 전체에 걸친 적층 방향을 제어함으로써 블레이드의 강성과 질량 분포를 더욱 세밀하게 조정할 수 있도록 해준다. 하지만 이 방식의 가장 큰 장점은 제조 일관성, 반복성, 그리고 생산 속도이다.
- Hill Helicopters의 수석 복합재 엔지니어인 딘 리지웨이는 “모든 재료를 동시에 적층하고 경화시키면 섬유 배치에 대한 제어력이 향상되고, 변동성을 유발할 수 있는 접합면을 제거할 수 있다.”라고 설명한다. “이를 통해 이상적인 역학적 성능에 필요한 정확한 질량 분포를 더 쉽게 구현할 수 있다. 결과적으로 2만 시간의 TBO(Time Between Overhaul)를 가진 블레이드를 일관되게 생산할 수 있으며, 하루에 12개씩 생산할 수 있다.”

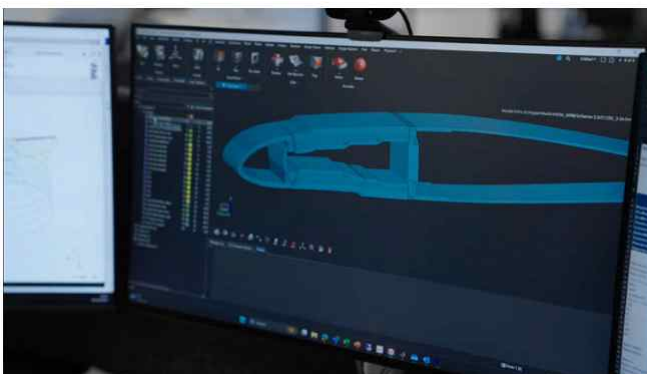


그림 1. 칼날 단면의 CAD 설계.



그림 2. 로터 블레이드 플라이 배치. 천장 레이저 위치 지정 시스템의 안내에 따라 CFRP 첫 번째 층이 금형에 배치된다.

로터 블레이드 설계

- 설계 단계에서 Hill의 엔지니어링 팀은 정교한 로터 후류 특성 분석 코드, 전산 유체 역학 방법론 및 고급 구조 동역학 시뮬레이션을 개발했다. 이러한 도구들을 함

게 사용하여 블레이드의 공기역학적 형상, 강성 및 질량 분포를 정의하고 블레이드가 로터 후류 환경과 어떻게 상호 작용하는지 평가했다.

- Ridgway는 "로터 후류의 거동은 국부적인 급증과 비선형적 특성을 지닌 복잡한 3차원 유동장으로, 예측하기가 매우 어렵다."라고 말한다. "단순히 기본 원리에서 계산할 수 있는 것이 아니라, 실험 데이터로 검증된 정교한 수치 해석 방법이 필요하다."
- 블레이드의 공기역학적 형상은 낮은 날개 끝 속도를 위한 포물선형 날개 끝과 블레이드 전체 길이에 걸쳐 연속적인 층류 흐름을 위한 에어포일 형상을 포함한다. 이는 날개 형상이 작동 중 로터 회전 속도에 맞춰 설계되어 전체 길이에 걸쳐 일관된 양력을 생성함을 의미한다.
- 이러한 특징 덕분에 항공기는 500마력 엔진으로 목표 순항 속도인 140노트를 달성하고 2,000kg 이상의 양력을 낼 수 있다. 단면은 속이 빈 스파와 폼으로 채워진 후연부를 특징으로 한다. 속이 빈 스파는 조종 반응에 필요한 비틀림 및 굽힘 강성을 제공하며, 폼으로 채워진 후연부는 항공기의 조종 특성을 부여하는 고관성 로터 시스템에 필요한 정밀한 질량 분포에 기여한다.
- 각 블레이드는 이축 직조 및 단방향 프리프레그 형태로 된 100개 이상의 탄소섬유 및 유리섬유 강화 폴리머(CFRP, GFRP) 층으로 구성된다. 이러한 소재 선택을 통해 적층 과정에서 섬유 방향을 맞춤화하여 특정 동적 특성을 구현하도록 조정 가능한 방향성 강성을 생성하고, 로터의 길이와 폭 전체에 걸쳐 무게를 맞춤화할 수 있다. 추적 및 균형 조정 방식은 트림 웨지와 스팬 방향 및 코드 방향의 균형추를 사용하여 전체 로터 시스템의 최적 동적 균형을 달성하기 위한 다양한 조정 옵션을 제공한다.
- 적층 공정은 외부 스킨을 틀 반쪽에 배치하여 공기역학적 표면을 형성하는 것으로 시작된다. 레이저 프로젝터를 사용하면 작업자가 각 층의 위치를 정확하게 지정할 수 있을 뿐만 아니라, 생산되는 모든 블레이드의 모든 층에 대한 포괄적인 제작 기록을 통해 완벽한 추적성을 유지할 수 있다.
- 이러한 디지털 통합은 항공우주 인증 및 생산 중 공정 편차를 식별하는 데 필수적이다. 외부 스킨 층 다음에는 주요 하중 지지 구조인 스파를 맨드릴에 감아 틀 내부에 배치한다. 트레이링 에지 코어를 추가하고, 경화 전에 상단 틀 반쪽을 제자리에 고정한다.
- 리지웨이는 "2차 접합 공정이나 두께 변화를 유발할 수 있는 접착층이 없고, 별도로 제조된 부품 간의 정렬 불량 가능성도 없다."라고 말한다. "금형에서 나오는 블레이드는 형상, 섬유 배향, 질량 분포 등 모든 것이 고정된 블레이드이다." 이 금

형은 확장성을 염두에 두고 설계되었다. 힐은 수요를 충족하기 위해 추가 금형을 제작할 예정이다. 완전 생산 시, HX50 4대에 사용되는 로터 12개가 매일 생산될 것이다.



그림 3. 맨드릴에 플라이를 배치한다. 메인 스파 프리프레그 플라이가 맨드릴에 감겨 있다.



그림 4. 로터 블레이드 가공. 로터 블레이드 금형은 통 알루미늄을 가공하여 제작되며, 견고한 핸들링 프레임에 장착된 상부 및 하부 반쪽으로 조립하기 전에 여러 부분으로 나누어 사내에서 제작된다.

금형 제작

- 이 원샷 공정용 금형은 통 알루미늄으로 가공되며, 상부와 하부로 조립하기 전에 사내에서 부분적으로 제작된 후 견고한 핸들링 프레임에 장착된다. 리지웨이는 "가공 과정에서 이 금형의 두 부분은 엄격한 공정을 거치는데, 완벽한 표면을 보장하기 위해 갠트리 밀링 머신에서 단일 유닛으로 사전 마감, 마감 및 연마 작업을 거칩니다."라고 설명한다. "이 방식은 생산 과정 전반에 걸쳐 치수 일관성을 제공하며, 이는 요구되는 엄격한 기하학적 및 균형 공차를 달성하는 데 매우 중요한 요소이다."
- 각 금형 절반에는 열전대가 내장된 프로그래밍 가능 로직 컨트롤러(PLC)로 제어되는 15개의 전기 카트리지 히터가 포함되어 있다. 이 히터는 온도 상승 속도, 유지 시간 및 냉각 속도를 포함한 경화 프로파일을 관리한다. 경화 과정 동안 사이클 온도는 약 120°C까지 서서히 상승한다. 열팽창 차이로 인한 잔류 응력을 줄이기 위해 금형 뿌리 부분에 스프링식 완화 메커니즘이 통합되어 있다. 단열재를 사용하여 생산 사이클 동안 에너지 소비를 최소화하는 동시에 금형 표면 전체에 균일한 열 분포를 보장한다.

최초 생산 블레이드 및 검증 방법론

- 이 개발 프로그램의 정점은 2025년 10월 말, 제조 금형에서 첫 번째 양산형 블레이드를 성공적으로 추출하면서 달성되었다. 블레이드는 금형에 통합된 프라이머 필름으로 인해 회색을 띠고 있었으며, 추가적인 샌딩 및 도색 작업을 거칠 준비가 되어 있었다.

- 초기 정성적 평가 결과, 블레이드의 강성과 형상은 예상과 일치하는 것으로 나타났지만, 이 글을 작성하는 시점까지는 상세한 기하학적 스캐닝 및 컴퓨터 단층 촬영 검사가 아직 수행되지 않은 상태였다.
- 검증 프로토콜에는 공정 일관성 및 관리 한계를 설정하기 위한 파괴 및 비파괴 검사 방법이 모두 포함된다. 최초 생산 블레이드에 대한 포괄적인 절단 분석이 상세한 검사 및 측정과 함께 수행될 것이다.
- 이 검사를 통해 제조 공정을 검증하고, 절단 분석 중에 발견된 이상 사항은 향후 생산 제품에 대한 초음파 검사 또는 컴퓨터 단층 촬영(CT) 검사의 중점 영역을 파악하는 데 활용될 것이다. 이러한 반복적인 접근 방식을 통해 품질 관리 방법을 정밀하게 조정하여 관련 결함을 정확하게 감지하는 동시에 생산 속도를 불필요하게 저하시킬 수 있는 오탐지를 최소화할 수 있다.
- 기계적 성능 검증 시험은 정적, 동적, 피로 및 충격 시험을 포함한 다양한 평가를 수행한다. 이러한 평가는 블레이드의 각 부분에 걸쳐 기계적 성능을 평가하기 위해 블레이드 끝단을 단단히 고정하는 것으로 시작된다. 시험은 비행 중 발생하는 복잡한 하중 조건을 모사하며, 특히 로터 후류의 난류와의 상호작용으로 발생하는 매우 역동적이고 비선형적인 하중에 중점을 둔다.
- Hill Helicopters의 CEO인 제이슨 힐은 “이 첨단 복합소재 메인 로터 블레이드의 개발은 수년간의 설계 및 제조 공정 혁신의 결과로 이루어진 중요한 성과이다.”라고 말했다. “이러한 최첨단 복합소재 부품에 대한 확장 가능하고 반복 가능한 제조 공정을 성공적으로 확립함으로써, 경쟁력 있는 가격을 유지하면서도 일반 항공 시장에 특화된 차세대 헬리콥터를 생산할 수 있게 되었다.”
- HX50 로터 블레이드 프로그램은 제조 공정 혁신을 통해 기존 방식으로는 구현하기 어려웠던 복잡하고 확장 가능한 복합재 부품 생산을 가능하게 하는 사례를 보여준다. GFRP와 CFRP를 적절히 활용하고, 중공 및 코어 구조를 적용하며, 원샷 경화 공정을 도입함으로써 로터 블레이드의 강성과 질량 분포를 정밀하게 제어할 수 있다.
- 이를 통해 블레이드의 고유 진동수가 로터 후류 여기 스펙트럼 범위를 벗어나도록 하여 성능과 내구성을 향상시킨다. 결과적으로, 설계 및 제조 공정 전반에 걸쳐 전략적으로 적용된 엔지니어링 지능 덕분에 이 혁신적인 기술은 목표인 20,000시간의 TBO(정비 주기) 달성에 매우 중요하다.



그림 5. 첫 번째 주 로터 블레이드가 분리되고 있다. HX50 메인 로터 블레이드 첫 번째 블레이드가 금형에서 분리되고 있다.



그림 6. Hill Helicopters 로터 블레이드가 녹색이다. Hill Helicopters의 주 로터 블레이드는 CFRP, GFRP, 단방향 및 이축 소재가 복합적으로 결합되어 단일 공정으로 경화된다. 출처 | Hill Helicopters

□ 미국 ST Engineering MRAS, 자동화, 통합 및 디지털화를 통해 엔진 나셀 혁신 추구(26.01.06.)

※ [Composites World] 금속 및 복합재 엔진 나셀과 복잡한 구조물 분야에서 쌓아온 회사의 엔지니어링 유산과 공정 자동화 및 디지털 제조에 대한 지속적인 투자는 미래 협력을 위한 기반 제공/ News

• <https://www.compositesworld.com/news/st-engineering-mras-pursues-nacelle-innovation-via-automation-integration-and-digitalization>

• #미국 #항공우주 # 복합소재 4.0 #오토메이션

• 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장

- 미국 캘리포니아주 롱비치에 위치한 JetZero가 실물 크기의 전익형 시연 항공기에 사용할 금속 배기 노즐의 설계 및 제작을 위해 미국 메릴랜드주 볼티모어에 위치한 ST Engineering MRAS를 선정한 것은 단순한 엔지니어링 역량 이상의 의미를 지닌다.
- 이는 차세대 추진 시스템을 지원하는 데 필요한 산업적 성숙도, 디지털 통합 및 인증 경험(금속 및 복합재 모두 포함)을 갖춘 제조 기업에 대한 신뢰를 보여주는 것이다.
- 2027년 비행 시험을 시작할 예정인 JetZero 실증기는 연료 소모량과 탄소 배출량을 최대 50%까지 줄이는 것을 목표로 하는 기술을 검증하기 위해 설계되었다. 추진 시스템 부품의 주요 공급업체인 ST Engineering MRAS는 향후 생산 및 인증 과정의 위험을 줄이기 위한 이 프로그램에 설계, 엔지니어링 및 제조 전문 지식을 제공하고 있다.
- 이 역할은 상업용, 방위용 및 신형 항공우주 플랫폼 전반에 걸쳐 엔진 나셀 시스템과 복잡한 항공 구조물을 공급해 온 ST Engineering MRAS의 오랜 입지를 기반으로 한다. 많은 제조업체들이 여전히 첨단 제조 개념을 양산 단계로 전환하는 데 주력하고 있는 반면, MRAS는 이미 디지털 연결 및 자동화 기능을 갖춘 제조 환경을 구축하고 운영하고 있다. 이러한 제조 기술은 현재 진행 중인 프로그램을 지원하는 동시에 미래 항공기 아키텍처를 위한 차세대 기술 구축의 토대가 된다.
- ST Engineering MRAS의 운영 담당 부사장 겸 기술 및 공정 엔지니어링 책임자인 미치 스미스는 "ST Engineering MRAS는 고객이 미래 플랫폼의 성능 요구 사항을 충족할 수 있도록 지원하는 기술을 개발하고 제공하는 것을 사명으로 삼고 있다." 라고 말했다. "차세대 소재, 첨단 자동화, 디지털 스레드라는 세 가지 핵심 기술 분야에 상당한 투자를 진행하고 있다. 이러한 기술을 통해 현재 및 미래 제품을 정해진 시간과 비용 내에서 고품질로 생산할 수 있도록 보장할 것이다."

재료공학을 뛰어넘는 엔지니어링

- 첨단 소재는 제품 성능의 핵심 요소이지만, ST Engineering MRAS의 강점은 이러한 소재를 설계, 산업화 및 인증하는 방식에 있다. 복합재 구조 분야에서 수십 년간 쌓아온 경험을 바탕으로, ST Engineering MRAS는 다양한 수지 시스템과 주요 공급업체의 탄소섬유 형태를 사용하여 엔진 나셀 부품을 제작한다.
- 이 회사의 제조 및 조립 전문성은 팬 카울, 흡입구 및 추력 역전 장치 구조를 포함한 다양한 항공기 구조물 및 엔진 나셀 부품에 걸쳐 있으며, 상업 및 방위 프로그램 전반에 걸쳐 사용된다. 엔지니어링 팀은 공기역학적 및 열 성능 요구 사항을 최적화된 구조로 구현하여 구조적 효율성과 낙뢰 보호, 내화성 및 조류 충돌 방지 기능을 균형 있게 조화시킨다.
- 설계와 생산 분야의 이러한 통합을 통해 ST Engineering MRAS는 제조를 고려한 설계 방식을 개발 및 생산 프로그램에 적용할 수 있다. 이는 설계 및 제조 공정을 반복 가능하고 대량 생산에 적합하게 만들어 FAA, EASA, 캐나다 교통부 및 CAAC의 강도, 피로 및 손상 허용 오차 인증 기준을 충족하도록 한다.



그림 7. JetZero 시연 항공기



그림 8. MRAS AFP 시스템.

엔지니어링을 가능하게 하는 자동화

- ST Engineering MRAS는 확립된 엔지니어링 원칙에 따라 제조 혁신에 접근한다. 자동화는 단순히 속도에 관한 것이 아니라 정밀성, 반복성 및 품질 보증에 관한 것이다.
- ST Engineering의 190만 평방피트 규모의 볼티모어 시설에서는 광범위한 클린룸 적층 및 조립 구역이 통합 제조 생태계의 일부로 운영된다. ST Engineering MRAS의 자동 섬유 배치(AFP) 시스템은 제품을 제작하는 동시에 재료를 검사하여 부품 제작 전반에 걸쳐 공정 매개변수를 실시간으로 모니터링하고, 주요 공정, 공구 세척, 음향 드릴링 및 로봇 조립으로 자동화를 확장하여 일관된 제품을 생산한다.
- 스미스는 “우리는 자동화와 인간의 전문성이 조화를 이루는 환경을 구축했다.”라고

설명하며, "우리 기술자들은 설계, 생산 및 검사를 연결하는 디지털 프레임워크 내에서 작업한다."라고 덧붙였다.

- 자동화는 생산 현장을 넘어 확장된다. 로봇은 음향, 열 및 LiDAR 센서를 사용하여 정기적인 시설 점검을 수행하고 장비 상태를 평가하며 이상 징후를 감지한다. 이러한 예측 모니터링은 제조 공정의 신뢰성을 높이고 MRAS의 운영 탄력성을 강화한다.

디지털 스레드는 생산성 향상에 기여하는 도구

- ST Engineering MRAS의 디지털 전략의 핵심은 개별적인 디지털 실험이 아닌, 높은 생산성과 인증된 생산을 지원하도록 설계된 데이터 스레드이다. 이 회사는 Plataine(미국 매사추세츠주 월섬)과 협력하여 디지털 적합성 인증 프로세스를 도입하고 있으며, 원자재 공급, 품질 검증, 제조 실행 및 자산 관리를 연결하는 AI 기반 프레임워크를 구축하고 있다.
- 이 시스템을 통해 공급업체의 자재 데이터는 생산에 투입되기 전에 디지털 방식으로 수집되고 AI를 사용하여 분석된다. 배송 컨테이너에는 자재의 이력, 열처리 이력 및 기타 자산 정보를 담은 디지털 정보가 내장되어 있다. 이 데이터는 도착 즉시 안전한 데이터 전송을 통해 자동으로 처리되며, 모든 데이터는 검증을 거쳐 모든 규정 준수 및 품질 요구 사항을 충족하는지 확인한다.
- 이러한 접근 방식은 원자재 흐름을 간소화하고, 수작업 개입을 줄이며, 인적 오류를 제거하고, 공급망 전반에 걸쳐 추적성을 강화한다. 더욱 중요한 것은 공급업체 정보를 제조 및 품질 시스템과 직접 연결하는 단일하고 신뢰할 수 있는 데이터 환경을 구축한다는 점이다.
- 디지털 스레드는 MRAS의 광범위한 제조 최적화 전략의 핵심 기반이기도 한다. 항공기 OEM 업체들이 생산량을 늘림에 따라, 특히 단일 통로 항공기 생산량 증대 요구에 대응하여 생산량을 늘림에 따라, 엔지니어링 의도, 제조 실행 및 품질 보증을 동기화하는 능력이 매우 중요해진다. 디지털 연속성을 통해 MRAS는 반복성, 인증 무결성 및 납품 성능을 유지하면서 처리량을 향상시킬 수 있다.
- 스미스는 "디지털 기술 관점에서 이것이 우리의 핵심이다."라고 말하며, "디지털 스레드를 통해 제조 흐름을 최적화하고, 생산량 증가를 지원하며, 모든 공정 단계에 품질을 확보할 수 있다."라고 덧붙였다.

프로그램 전반에 걸쳐 검증된 성숙도

- ST Engineering MRAS는 기존 플랫폼과 신형 플랫폼을 모두 아우르는 광범위한 포트폴리오를 통해 제조 역량을 입증해 왔다. 이 회사는 Boeing 767, 747, 777X는 물론 Airbus A320neo, 록히드 마틴 C-5 및 C-130J, Bombardier 글로벌 7500 항공

기를 위한 엔진 나셀 시스템과 복잡한 구조물을 설계 및 생산한다. 또한 Archer Aviation을 비롯한 여러 기업을 위해 고성능 복합소재 부품을 설계 및 제작한다.

- JetZero 블렌디드 윙 시연 프로그램은 이러한 기술이 차세대 항공기 개발에 어떻게 적용되는지 보여주는 최근 사례이다. 배기 노즐의 설계 및 제조업체인 MRAS는 효율성과 배출량 측면에서 획기적인 개선을 달성하는 것을 목표로 하는 추진 시스템을 지원하는 동시에 생산 및 인증 위험을 최소화하는 전략을 수립하고 있다.
- MRAS는 JetZero 및 추진 시스템 파트너와 협력하여, 자사의 오랜 경험을 바탕으로 축적된 복합소재 엔지니어링, 자동화 제조 및 인증 전문성을 활용하여 해당 부품이 기술적으로 우수할 뿐만 아니라 향후 프로그램 일정 내에 생산 및 인증이 가능하도록 보장하고 있다.
- 인증은 모든 엔지니어링 활동에 필수적이다. ST Engineering MRAS는 자체 시설 및 공인 시험 센터를 통해 구조, 피로 및 조류 충돌 시험을 수행하며, Part 25 및 Part 33 요구 사항을 숙지하고 있다.
- 이처럼 광범위한 인증 실적은 다른 나셀 공급업체들이 따라올 수 없는 산업적 준비 태세를 보여준다. ST Engineering은 다른 업체들이 개념 증명용 시제품에 집중하는 동안, 디지털 연동 생산 시스템인 MRAS를 통해 이미 검증된 나셀 구조물을 대규모로 생산하고 있다고 자부한다.

지속가능성과 공정 효율성

- ST Engineering MRAS의 지속가능성 개선은 디지털 기술을 활용한 공정 효율성 향상에 의해 점점 더 주도되고 있다. 이 회사는 디지털 모니터링 및 제어를 통해 오토클레이브 사이클을 적극적으로 최적화하여 에너지 효율을 개선하고 자산 활용도를 높이며 인증 요건을 충족하면서도 변동성을 줄이고 있다.
- MRAS는 경화 주기 최적화와 재작업 감소, 최초 품질 향상을 결합하여 생산 수명 주기 전반에 걸쳐 에너지 사용량과 재료 낭비를 눈에 띄게 줄이고 있다.
- ST Engineering MRAS의 인산 양극 산화 처리 라인과 자체 개발한 접착 프라이머 도포 공정은 NADCAP 인증을 획득하여 내식성과 환경 규정 준수를 보장한다. 마찬가지로, ST Engineering MRAS의 도장 시설에 사용된 디지털 모니터링 시스템은 배출량, 경화 주기 및 재료 사용량을 정밀하게 제어할 수 있도록 한다.
- 스미스는 “효율성은 우리 운영의 모든 단계에 스며들어 있다.”라고 말한다. “각 공정은 디지털로 연결된 시스템 내에서 운영된다. 섬유 배치부터 최종 도장까지, 생산량 향상뿐만 아니라 측정 가능한 지속 가능성 이점도 얻을 수 있다.”

차세대 엔진 나셀 제작

- MRAS는 팬 카울, 흡입구 및 역추력 장치 구조물을 포함한 다양한 항공기 구조물 및 엔진 나셀 부품에 대한 제조 및 조립 전문성을 보유하고 있다.
- ST Engineering MRAS의 현재 연구 개발 활동에는 첨단 복합재 구조 개발, 향상된 방음 성능, 복잡한 공기역학 및 열적 요구 사항을 충족하도록 설계된 접합 구조 개발이 포함된다. 또한 엔지니어링 팀은 하이브리드 전기 및 초고바이패스 추진 개념의 요구 사항에 맞춰 전기 시스템, 센싱 기능 및 열 관리를 더욱 효과적으로 통합한 나셀 설계를 준비하고 있다.
- 이러한 노력은 디지털 제조 도구와 데이터 연속성을 통해 뒷받침되며, 미래의 나셀 설계가 처음부터 생산, 인증 및 수명 주기 지원을 염두에 두고 개발되도록 보장한다.
- 전략 및 사업 개발 책임자인 수가토 바타차르지는 추진 개념이 더욱 분산되고 기계와 통합됨에 따라 이러한 시스템 수준의 관점이 필수적이라고 강조한다. 그는 "미래의 엔진 나셀은 최적화된 복합소재 프레임워크 내에 센싱, 전기 구동 및 열 관리 시스템을 통합할 것이다."라고 설명하며, "디지털 트윈 및 예측 정비 도구와 상호 작용하여 설계, 제조 및 운영 간의 지속적인 데이터 교환을 가능하게 할 것이다. 이것이 바로 우리가 이미 설계하고 있는 방향이다."라고 덧붙였다.
- 바타차르지는 "우리는 고립된 채 혁신하지 않는다."라고 덧붙였다. "우리의 개발 프로그램은 고객 로드맵에 맞춰 진행되며 실제 운영 환경에서 검증된다. 목표는 단순히 실험을 위한 실험이 아니라, 즉시 대규모 생산이 가능한 엔지니어링 발전을 이루는 것이다."

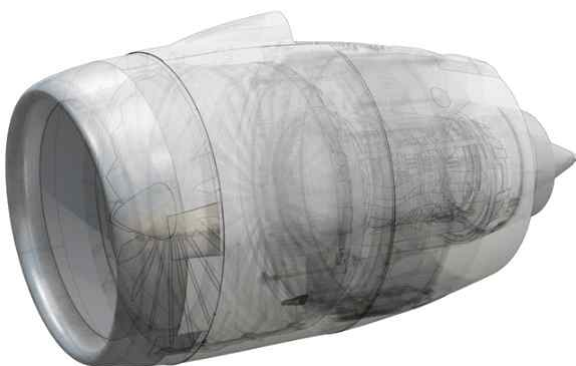


그림 10. MRAS에서는 디지털 도구와 확립된 제조 원칙이 조화를 이루어 첨단 추진 기술을 구현한다.
출처 | ST Engineering MRAS

□ 필라멘트 와인딩 응용 분야, 공정 모델링의 필요성(26.01.07.)

※ [Composites World] 온도, 맨드릴 재질 및 두께, 그리고 기타 요인들이 반복 가능한 필라멘트 와인딩 복합재 쉘 제조 결과에 미치는 영향에 대한 논의./ News

- <https://www.compositesworld.com/articles/the-need-for-process-modeling-in-filament-winding-applications>
- #리포트 #필라멘트 와인딩 #탄소섬유 #압력 용기 #복합소재 #열가소성 수지 #시장 #에폭시
- 저자 : 던컨 J. 로리, Lawrie Technology Inc. 대표
- 필라멘트 와인딩은 압력 용기, 구동축, 전기 퓨즈 및 기타 여러 회전체와 같은 복합 재료를 생산하는 데 널리 사용되는 핵심 제조 공정이다.
- 섬유 구조는 용도에 맞게 선택되는데, 예를 들어 구동축에는 45° 나선형 층이 적합하고 압력 용기에는 약 90° 후프가 더 많이 사용된다. 이러한 응용 분야를 비롯한 많은 응용 분야에서 구조 설계 및 와인딩 장비는 고도로 발달되어 있지만, 필라멘트 와인딩 공정은 일반적으로 생각하는 것보다 훨씬 더 복잡하다. 이로 인해 필라멘트 와인딩 쉘의 성능 및 반복성 측면에서 심각한 산업적 한계가 발생하지만, 공정 모델링을 통해 이러한 문제를 해결할 수 있다.
- 이 보고서에서는 현재의 분석 기법과 제조 및 재료 관련 고려 사항을 살펴보고, 압력 용기, 영구 자석 모터(PMM) 로터, 구동축 및 심해 잠수정 등의 사례를 통해 이러한 요소들이 공정 모델링의 필요성을 뒷받침하는 이유를 설명하고자 한다.

일반적인 구조 분석의 문제점

- 필라멘트 와인딩 복합재 쉘의 성능 최적화를 위한 방대한 해석적 및 수치적 방법들이 존재한다. 이러한 방법들은 일반적으로 와인딩된 적층판의 품질이 양호하고 공개된 적층판 물성을 활용할 수 있다고 가정한다. 그러나 와인딩 공정 중 발생하는 본질적으로 비선형적인 응력 상태를 최적화하는 것이 복잡하고 아직 충분히 이해되지 않았기 때문에, 적층판에는 섬유의 굴곡, 좌굴 및 공극이 흔히 발생한다.
- 공정 모델링에는 일반적으로 선형 근사법이 사용되며, 섬유 장력, 곡률 반경 및 섬유 각도를 이용하여 권선 중 맨드릴에 작용하는 반경 방향 압력을 계산한다.
- 곡률 반경이 원하는 벽 두께에 비해 큰 경우, 맨드릴 계면 압력은 일반적으로 첫 번째 층의 압력에 층 수를 곱하여 계산한다. 이러한 유형의 분석은 연속적인 층의 실제 반경 방향 위치를 추정하고 벽 두께를 통한 압력 구배를 계산함으로써 더욱 정밀해질 수 있다. 최신 수소 압력 용기의 경우, 이 접근 방식을 사용하여 탄소섬유 층을 연속적으로 추가함에 따라 발생하는 붕괴를 방지하면서 얇은 폴리머 라이너를 팽창시키는 데 필요한 공기압을 결정할 수 있다.

- 진공 백킹, 오토클레이브 경화 또는 유압 프레스를 사용하여 단방향(UD) 또는 직물 보강재로 제조되는 일반적인 복합 적층판의 섬유 부피 분율(Vf)은 25~75% 범위이다. 이러한 공정에서는 적층판의 열 경화 동안 두께 방향으로 일정한 압력이 가해진다. 그러나 필라멘트 와인딩 공정에서는 적층판에 가해지는 압력이 증가함에 따라 층 두께가 감소하고 Vf가 증가한다. 따라서 필라멘트 와인딩 공정에 대한 분석은 실제로 "성장하는 물체"의 역학에 대한 연구이다. 즉, 벽 두께가 증가함에 따라 맨드릴에 가해지는 압력이 증가한다.
- 툴링은 내경(ID)에만 적용되며, 전통적으로 외경(OD)에는 고정 툴링이 없다. 툴링은 대개 분리 가능한 맨드릴이지만, 압력 용기의 경우 플라스틱 또는 금속 라이너, PMM(압축 연마기)의 경우 금속 로터일 수도 있다. 필요한 적층 수가 증가함에 따라, 적층 시의 층 장력과 중간층의 반경 방향 위치가 후속 층의 추가 압력에 따라 변화하기 때문에 맨드릴 계면 압력에 대한 중간층의 기여도가 감소한다.

PMM 로터의 필라멘트 권선

- 압력 용기와 심해 잠수정은 두꺼운 벽의 필라멘트 권선 구조의 예이지만, PMM 로터는 더 얇은 권선을 특징으로 한다.
- PMM은 고정된 스테이터 내부에 영구 자석이 있는 고속 회전 로터를 사용한다. 2022년 CW 기사 에서 설명했듯이, 고강도 경량의 로터 보호 밴드를 로터 주변에 감아서 제작함으로써 강력한 원심력에도 로터-자석 어셈블리가 분리되지 않도록 한다.
- PMM의 전력 밀도를 향상시키기 위해서는 고정자와 회전자 사이의 간격을 최소화해야 하므로, 권선은 얇고 치수 정밀도가 높으며 사용 중 팽창률이 낮아야 한다.
- 이 현상은 해군 잠수정 구조물과 같은 두꺼운 필라멘트 와인딩 복합소재에서 더욱 심화된다. 이러한 부품에서 중간층은 장력과 그에 따른 원주 방향 응력을 받으며 감기지만, 이러한 응력이 완전히 소실되어 결국 후방층의 지속적인 방사형 압력으로 인해 좌굴될 수 있다. 장력을 줄이는 공정을 통해 이러한 현상을 다소 개선할 수 있지만, 공정의 고도로 비선형적인 특성을 완전히 없앨 수는 없다. 따라서 주름, 파형 및 좌굴은 두꺼운 복합소재 외피에서 흔히 발생하는 현상이다.
- PMM 로터에 적용되는 얇은 벽 쉘의 경우, 권선 과정에서 중간층의 원주 방향 인장 응력이 완전히 손실될 가능성은 낮지만, 선형 계산을 사용하여 예측한 값에 비해 전체 밀폐 압력이 약 20% 감소하는 현상이 흔히 발생한다.

열경화의 어려움

- 위에서 언급했듯이 맨드릴 계면 압력은 중요한 공정 변수이다. 대부분의 필라멘트 와인딩 공정에서는 제품을 감고 경화시킨 후 맨드릴에서 분리하여 동일한 툴링에

서 다음 부품을 제작할 수 있도록 해야 한다.

- 부품 분리를 위해서는 경화 후 계면 압력이 0이 되어야 하며, 부품과 툴링 사이의 간격이 작을수록 좋다. 일반적으로 열 경화를 통해 이러한 조건을 충족하기 위해서는 맨드릴 재질 및 두께, 경화 온도 등 여러 변수를 제어해야 한다.
- 후프 와인딩 탄소섬유의 경우, 후프 열팽창 계수(CTE)가 0에 가깝기 때문에 어떤 금속 맨드릴 재질이라도 사용할 수 있다. 그러나 압력 용기나 구동축과 같은 응용 분야에서는 90° 미만의 각도로 감은 나선형 층도 필요하다.
- 이러한 층은 동일한 섬유 장력에서 와인딩 시 계면 압력을 감소시키고(0° 또는 축 방향 와인딩 시에는 압력이 0임) 더 큰 CTE 값을 갖는다. 나선형 또는 축 방향 층을 사용할 때 공정 제어를 유지하고 경화 후의 간극 및 최종 치수를 예측하려면 맨드릴이 가열 시 복합 적층재보다 더 많이 팽창해야 한다. 따라서 고온에서 양의 계면 압력을 확보하고 냉각 후 부품 제거에 필요한 압력 0 및 간극을 확보하기 위해서는 제안된 복합 적층재보다 CTE가 큰 맨드릴 재질을 선택하는 것이 중요하다. 이는 탄소섬유와 CTE가 다른 섬유를 사용할 때도 고려해야 할 요소이다.
- 하지만 경화 과정 또한 최종 부품 품질에 영향을 미치므로 부품 분석에 포함되어야 한다. 오븐 내부 온도가 상승함에 따라 미경화 복합재와 맨드릴은 서로 수축하여 평형 직경에 도달하는데, 이때 열적 요인이 장력에 의한 권선 과정에서 발생하는 계면 압력에 상당한 영향을 미칩니다.
- 미경화 복합재는 반경 방향 변형률과 원주 방향 변형률 모두에 의해 직경이 증가하지만, 경화 후에는 원주 방향 변형률에 의해서만 수축한다.
- 이는 경화된 적층재가 경화 전 섬유와 습식 수지보다 두께 방향으로 수 배 더 단단하기 때문이다. 이러한 특성을 이용하여 부품 제거 및 다음 권선 부품에 맨드릴을 재사용하기 위해 계면에서 발생하는 상온 간극을 계산한다. (대부분의 회사는 이를 공정 모델링이 아닌 실험적으로 수행한다.)
- PMM 로터 밀폐 밴드의 경우, 고온 경화는 권선된 자석의 압축 압력을 완전히 제거하거나 크게 줄여준다. 따라서 초고속 로터의 PMM 로터 래핑에는 상온 경화가 필요하다.



그림 11. 대구경 PMM 로터의 초고전압 필라멘트 와인딩. 대구경 PMM 로터의 초고전압 권선 (왼쪽) 및 후속 동적 밸런싱(오른쪽).

- 따라서, 고도로 비선형적인 권선 공정은 특히 두꺼운 복합재 쉘에서 중간층의 무

결성을 쉽게 손상시킬 수 있다. 적절하게 팽창하는 맨드릴을 사용한 열 경화는 여기에 또 다른 비선형 공정을 추가한다. 그러나 팽창하는 맨드릴에 의해 가해지는 추가적인 방사형 압력이 권선 공정으로 인해 발생하는 굴곡이나 좌굴을 제거할 것이라고 가정하는 것은 잘못이다.

- 내경에 가장 가까운 층에는 추가적인 원주 방향 장력이 발생하지만, 외경에 가까운 층은 이러한 새로운 압력을 훨씬 적게 받기 때문에 가열 전에 이미 굴곡이나 좌굴이 발생한 경우 그대로 남아 있는 경우가 많다.

잔류 응력 발생

- 열 경화는 금형 재사용을 가능하게 하는 필수적인 반경 방향 간극을 생성하는 데 도움이 되지만, 단점도 있다. 금형에서 분리된 완성된 자립형 용기는 순 원주 응력이 0이어야 하지만, 이는 항상 내경(ID)의 잔류 인장 응력과 용기 중앙 또는 외경(OD)의 잔류 압축 응력을 포함한다. 특히, 이러한 상당한 잔류 응력은 압력 용기의 구조적 성능을 저하시킬 수 있다.

- 그림 12는 두께 14mm의 탄소섬유 셸을 직경 300mm, 벽 두께 12mm의 강철 맨드릴에 90° 각도로 감았을 때 벽면을 통한 원주 응력의 비선형 분포를 보여준다.

- 섬유 장력은 10파운드힘(lbf)이었고 경화 온도는 250°F였다. 감은 후 내경(ID)에서의 예측 원주 응력은 60MPa(8.7ksi)였고, 가열 후에는 319MPa(46.3ksi)였다. 외경(OD)에서는 감은 후 81MPa(11.75ksi)로 예측되었고 가열 후에도 변화가 없었다.

- 가장 흥미로운 점은 감는 작업이 완료된 후 벽 두께의 거의 절반이 원주 압축을 받고, 이 중 일부는 온도가 상승한 후에도 남아 있다는 것이다. 온도에 따른 원주 응력의 이러한 분포는 중요하다. 왜냐하면 이 분포는 응고 및 냉각 후에도 유지되어 좌굴된 섬유가 경화된 셸의 영구적인 부분이 되기 때문이다. 또한 냉각 후 잔류 응력이 발생하며, 셸의 원주 방향 열팽창 계수에

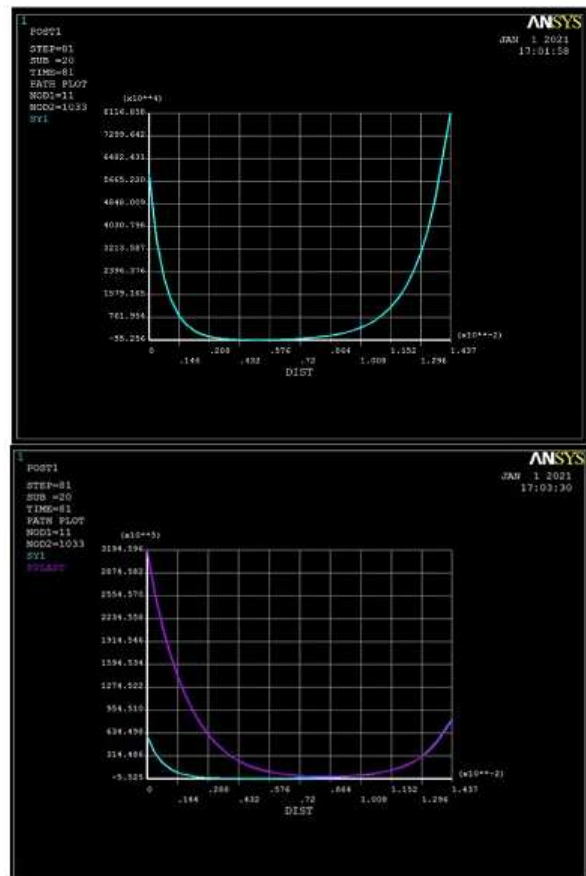


그림 12. 10 lbf의 섬유 장력, 250°F의 경화 온도, 14 mm의 권선벽 두께를 사용하여 권선 후 (청록색, 위쪽)와 가열 후(보라색, 아래쪽)의 원주 응력을 나타낸 그래프. 아래쪽 그래프의 세로 축은 재조정되었다. 가열 후에도 중간 두께 부분의 압축이 유지됨을 알 수 있다.

따라 복합재의 직경이 다소 감소한다.

- 두꺼운 쉘의 굴곡 문제를 완화하기 위해 사용된 임시방편으로는 두께의 작은 부분을 순차적으로 경화시키는 방법이 있다. 이 방법은 공정에 며칠을 추가하게 되지만, 경화된 부분의 외경을 가공하는 것으로, 다음 부분을 감기 시작할 때 매끄러운 표면을 제공하고 매번 외경의 잔류 응력을 제거한다. 결과적으로 새로운 잔류 응력 상태가 발생하고 측정된 내경이 감소한다. 쉘 전체의 치수가 변하기 때문에 상당히 큰 치수 공차가 요구된다.
- 연속적인 구간을 감고 가공하는 이러한 방식은 심해 잠수정 타이탄(Titan)에 사용된 것으로 보인다.
- 그림 13은 좌굴된 25mm 두께의 단면을 보여준다. 좌굴된 부분 위아래의 흰색 선은 가공된 표면을 나타낸다. 이러한 광범위한 좌굴은 타이탄에 사용되었을 것으로 추정되는 2~3lbf의 장력으로 감을 때 발생한다. 그림 13은 경화된 25mm 두께의 단면 5개 중 하나를 보여준다. 대안으로, 좌굴을 방지하기 위해 5mm 두께의 경화된 단면 25개를 사용할 수도 있었지만, 비용과 물류 측면에서 바람직하지 못한 결과를 초래했다. 또는, 우수한 공정 모델을 사용하여 전체 125mm 두께의 적층재를 한 번에, 층 변형이나 2차 가공 없이 감을 수 있도록 섬유 장력을 최적화할 수 있었을 것이다.

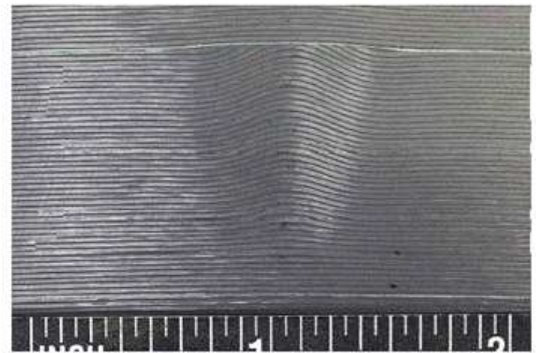


그림 13. 타이탄 V2 선체 끝부분의 주름. 출처 | 미국 해안경비대 해양조사위원회 "실험용 오션게이트 잠수정 타이탄 재료 조사", 2024년 9월 25일.

재료적 고려사항

- 비용 절감과 생산량 증대는 많은 필라멘트 와인딩 응용 분야에서 핵심적인 고려사항이 되었다. 수소 연료 자동차 및 우주선용 압력 용기는 더 높은 성능과 생산 속도에 대한 요구를 증대시키고 있으며, 전기 모터용 복합재 로터/스테이터 슬리브는 PMM(포털 자석 모터)에서 자석을 고정하기 위해 더 높은 회전 속도와 매우 높은 섬유 장력을 요구한다. 이러한 발전은 와인딩 재료 및 공정에 대한 연구를 촉진하고 있다.
- 탄소섬유는 일반적으로 선호되는 소재이며, 비용 순으로 열가소성(TP) 테이프 또는 토우프레그, 열경화성(TS) 토우프레그 또는 저점도 TS 수지에 내장될 수 있다. 이러한 소재들은 또한 다양한 탄소섬유 토우 크기를 사용하여 층 두께를 제어할 수 있다.
- TP 토우와 테이프는 원자재 및 공정 장비 측면에서 가장 비싼 옵션이지만, 맨드릴

에 상당한 열이 전달되지 않고 레이저 가열을 통해 현장에서 응고가 가능하다는 장점이 있다.

- 최근 항공기 추진용 PMM 개발 프로젝트에서는 이러한 실질적인 이점 때문에 TP 테이프를 선택하고 있다. 그러나 TP 테이프 공급업체는 일반적으로 최대 Vf(용융율)가 약 55%에 불과하다.
- PMM 로터의 경우, 이는 로터의 외면(영구 자석 포함)과 스테이터의 내면 사이의 작은 공극에 설치할 수 있는 레이어 수가 줄어든다는 것을 의미한다. 이러한 문제가 없는 다른 응용 분야에서도 레이저 응고 방식은 여전히 어려움이 될 수 있다. 오븐에서 가열하지 않고 레이어별로 응고가 이루어지기 때문에 맨드릴의 열팽창이 발생하지 않아 냉각 시 부품 제거를 위한 틈이 생기지 않는다. 권선 중에 발생하는 계면 압력은 그대로 유지되므로 맨드릴을 제거하려면 접이식 툴링과 같은 다른 방법을 사용해야 한다.
- TS 토우프레그는 TP 테이프보다 저렴하지만 열 경화가 필요하다. TS 토우프레그와 TP 토우 및 테이프 모두 권선 과정의 "성장 단계" 동안에는 수지가 흐르지 않는다. 그러나 토우프레그는 액체 수지 권선과는 다른 방사형 압력 및 원주 응력 결과를 나타내지만, 마찬가지로 매우 비선형적이다.
- 주요 이점은 청결성이지만, 문제는 권선 중 층별 Vf가 국부적인 압력에 맞춰 조절되지 않는다는 것이다. 온도에서 겔화 직전에는 층 내 수지가 부족하거나, 겔화 전 주어진 시간 내에 표면으로 빠져나가지 못하는 과잉 수지가 발생할 수 있다. 필라멘트 권선에 최적화된 토우프레그는 온도에서 낮은 점도와 그 낮은 점도에서의 충분한 체류 시간을 가질 수 있지만, 벽을 통한 예상되는 Vf 변화에 적합한 토우프레그 내 수지 함량을 지정하는 것이 중요하다.
- 습식 권선. 그림 12와 아래의 민감도 분석에서 수행된 수치 모델링은 액체 TS 수지를 사용한 습식 권선을 가정한다. 이 경우 압력이 가해지고 Vf가 증가함에 따라 수지가 층 사이를 통과하여 표면으로 지속적으로 이동할 수 있다.
- 내경(ID)과 섬유 장력에 따라 계면 압력은 20psi에서 5,000psi까지 증가할 수 있다! 단방향 Vf는 20psi에서 52%, 5,000psi에서 75%일 수 있으며, 이에 따라 층 두께에도 큰 차이가 발생한다. 습식 권선은 이러한 넓은 범위의 압력을 수용할 수 있다. PMM(압축 연마) 응용 분야의 경우, 액체 TS 수지를 사용하면 상온 경화가 가능하므로 맨드릴 팽창 및 계면 압력 손실 없이 기포가 없는 가변 Vf 셀을 생산할 수 있다는 중요한 이점이 있다. 따라서 액체 수지 공정은 다소 복잡할 수 있지만 많은 응용 분야에서 여전히 표준 공정으로 여겨진다.
- 요약하자면, 세 가지 주요 재료 선택지 중에서 액체 TS 와인딩은 직경이나 벽 두

께에 관계없이 벽 전체에 걸쳐 기포 없이 층 두께와 Vf를 다양하게 조절할 수 있다. TS 토우프레그는 공정 중 Vf 맞춤 조절이 불가능하지만 더 깨끗하고 노동력이 적게 들며 벽 두께가 얇은 용도에 적합할 수 있다. TP 토우 및 테이프는 경화 단계가 필요 없고 층 주름 발생 가능성 없이 가장 깨끗한 공정을 제공하지만 일부 응용 분야에서 요구하는 높은 Vf와 높은 비강도를 제공하지 못할 수 있다.

크고 두꺼운 벽을 가진 조개껍질에 대한 분석 시 고려 사항

- 위에서 설명한 배경은 필라멘트 와인딩 공정의 모든 측면을 포착하기 위해 필요한 상당히 복잡한 모델링을 보여준다. 당연히 많은 와인딩 애플리케이션은 경험에 기반한 접근 방식으로 개발된다. 예를 들어, 만족스러운 결과가 나오면 품질 보증 문서에서는 아무것도 변경하지 않도록 요구한다. 그러나 제품이 단품이거나 금형 또는 부품 투자 비용이 매우 높은 경우에는 이러한 방식이 만족스럽지 못하다.
- 두꺼운 벽을 가진 대구경 권선 쉘에 적합한 복합재 권선 공정을 위해서는 맨드릴 추출에 필요한 간격, 층 좌굴을 방지하는 데 필요한 섬유 장력, 그리고 잔류 응력 추정치를 사전에 파악하는 것이 중요하다.
- 대형 수소 저장 용기가 그 예인데, 이 경우 탱크 벽의 약 3분의 2가 90°로 권선된다. 라이너가 내부 금형선을 형성하므로 제거할 필요는 없지만, 강도를 극대화하고 비용을 최소화하기 위해서는 층 좌굴 및 기포 발생을 방지하는 것이 바람직하다.
- 심해 잠수정은 또 다른 예이다. 2023년 6월의 실패로 가장 잘 알려진 타이탄은 두꺼운 탄소섬유 복합재 외피를 특징으로 한다. 타이탄의 실패는 광범위한 부정적인 여론을 불러일으킨 비극적인 사건이었다. 이 칼럼은 관련된 사실들을 분석하려는 것이 아니라, 타이탄의 대략적인 크기를 예시로 들어 설명하고자 한다.
- 심해 잠수정은 수중에서의 가벼운 무게, 매우 높은 비강도 및 강성, 그리고 최적화된 섬유 중심 설계의 뛰어난 피로 성능 때문에 필라멘트 와인딩 탄소섬유를 적용하기에 완벽한 분야이다. 이러한 설명은 실패 이후의 여론과는 상반되지만, 여전히 사실이다.
- 타이탄의 설계 및 분석은 전문적이고 훌륭하게 수행되었을 가능성이 높지만, 설계된 대로 제작하는 것은 실제적인 어려움이었으며, 그림 13에서 볼 수 있는 심각한 좌굴 현상이 이를 증명한다. 이 이미지는 복원된 25mm 두께의 단면을 보여주는데, 변형된 층들은 타이탄 임무에 필요한 심해에서의 원주 방향 압축 강도를 제공할 수 없다. 해당 용기는 전체 벽 두께가 약 125밀리미터였으며, 25밀리미터 두께의 다섯 부분으로 나누어 순차적으로 경화 및 연마 처리되었다.
- 타이탄과 거의 같은 직경을 가진 탄소섬유 복합재 쉘의 또 다른 예로는 미국 해군 핵잠수함 추진축이 있다. 큰 축 동력과 낮은 회전수(rpm)를 가진 약 18미터 길이

의 추진축은 비틀림 좌굴과 공진 주파수를 방지하기 위해 나선형 층과 보조적인 원주 방향 및 종방향 층으로 구성되어야 한다.

- 직경이 약 1.25미터인 경우, 섬유 장력으로 인한 압축 압력은 일반적인 소직경보다 훨씬 작으며, 두꺼운 벽 두께는 광범위한 층 좌굴과 공극 발생에 최적의 조건을 제공한다. 또한, 맨드릴이 접을 수 있는 형태가 아니라면, 공정 모델링 및 최적화 없이는 18미터 길이의 맨드릴을 제거하는 것은 큰 위험 요소이다.

민감도 분석 결과 문제점이 드러났다.

- 아래 그래프는 타이탄 로켓, 수소 저장 탱크 및 해군 추진축 과 유사한 형상을 모델링하기 위해 설계된 민감도 분석 결과를 보여준다. 이 분석에서는 습식 권선 방식의 표준 탄성 계수 24K 탄소섬유에 대해 후프층만 고려하고 250°F(약 121°C)에서 경화시켰다. 시뮬레이션에 사용된 맨드릴은 무게를 최소화하고 발생 가능한 계면 압력 하에서 파손되지 않도록 9.5mm 두께의 강철 원통을 선택했다. 연구된 섬유 장력은 2~50lbf(약 0.9~23.7kgf) 범위였으며, 권선층 수는 8~80층 범위였다.

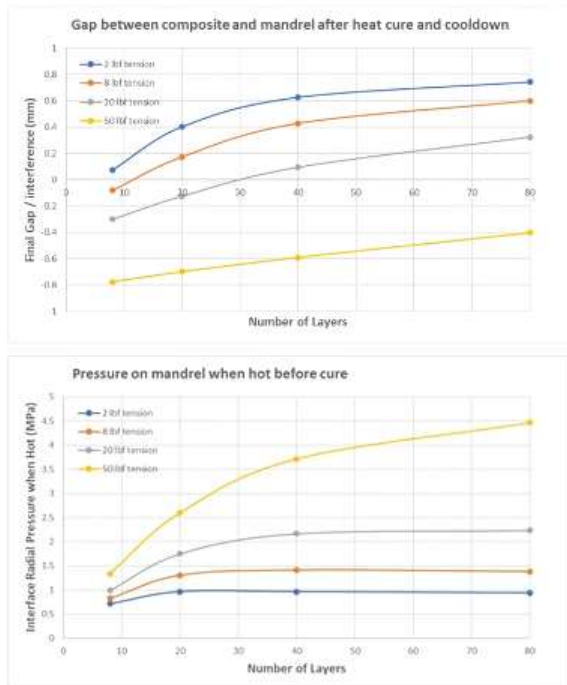


그림 14. 냉각 후 맨드릴에서 얻은 간격을 보여주는 그래프(위), 경화 직전의 맨드릴 압력 곡선을 보여주는 그래프(아래). 냉각 후 맨드릴에서 얻은 간격(위) 및 경화 직전 맨드릴 압력(아래).

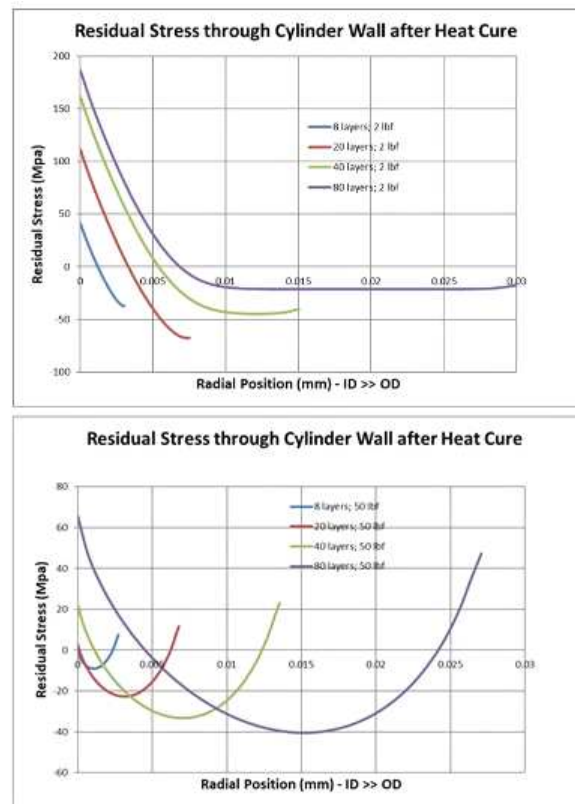


그림 15. 2 lbf 장력에서 권선에 발생하는 잔류 응력. 50lbf 장력에서 권선에 발생하는 잔류 응력. 2파운드(lbf) 인장(상단) 및 50파운드(lbf) 인장(하단)을 사용하여 경화 및 냉각 후 잔류 응력 발생.

- 그림 14(상단)의 오른쪽 그래프는 50lbf 인장력(노란색 곡선)에서 모든 경우에 상당한 반경 방향 간섭이 남아 있기 때문에 맨드릴에서 제거할 수 있는 쉘 두께가 없

음을 보여준다. 20lbf 인장력(회색)의 경우, 맨드릴에서 쉘을 제거하려면 30개 이상의 층이 필요하다.

- 다음 그래프(그림 14 하단)는 수지 점도가 낮은 상태인 경화 직전 온도에서의 맨드릴 계면 압력을 보여준다. 이 시점에서는 최종 섬유 구조가 이미 결정된 상태이다. 50 lbf 미만의 장력에서는 추가 층이 생기면서 곡선이 평평해지는데, 이는 추가 층이 계면 압력에 기여하지 않음을 시사한다. 또한, 추가 층은 여전히 젖어 있는 상태이므로 경화 전에는 압축을 견딜 수 없어 좌굴이 발생한다.
- 그림 15는 2 lbf와 50 lbf의 권선 장력에서 연구된 쉘 두께 범위에 대해 발생하는 잔류 응력을 비교한다. 연속된 곡선은 수직축에서 오른쪽으로 이동하면서 층이 증가함에 따라 잔류 응력이 증가하는 것을 보여준다.
- 2파운드(lbf)의 권선 장력에서는 모든 쉘 두께에 대해 내경(ID)에서 잔류 원주 응력이 훨씬 높고 외경(OD)에서는 잔류 압축 응력이 비교적 낮다. 반면, 50파운드(lbf)의 권선 장력에서는 내경과 외경 모두에서 인장 잔류 원주 응력이 발생하지만, 중간 두께의 재료는 부품이 맨드릴에서 분리되어 자유롭게 떠 있을 때 필요한 순응력 0을 제공하는 데 필요한 잔류 원주 압축 응력을 유지한다.
- 특히, 이 낮은 권선 장력은 탄소섬유 제조업체가 생산 라인 마지막 단계에서 섬유를 포장할 때 일반적으로 사용하는 3~4 lbf의 장력과 매우 유사하다. 최종 사용자는 물론 이 포장을 권선 공정에 직접 사용할 수 있지만, 장력은 약 10 lbf까지만 가능하다. 그 이상으로 장력이 가해지면 장력이 마치 치즈 와이어처럼 포장을 끊어버리고 남은 재료를 손상시킨다.
- 해결책은 섬유가 스펙에서 나온 후 장력을 추가하는 것이며, 위에서 언급했듯이 굽힘 없는 층을 얻으려면 상당한 장력이 필요한 경우가 많다.

논의 및 결론

- 본 연구는 특정 부품 형상에 대한 단편적인 분석일 뿐이다. 경화 온도, 맨드릴 재질 및 두께, 그리고 기타 여러 요인들이 권선 결과에 영향을 미칠 수 있다는 점에 유의해야 한다.
- 하지만 장력이 높을수록 권선된 쉘의 품질, 강도 및 치수 정확도 등 모든 측면이 향상된다는 것은 분명하다. 특히, 정확한 공정 모델을 사용하면 일반적인 0.030인치 내경 공차를 0.003인치까지 10분의 1 수준으로 줄일 수 있다. 기포가 없고 뒤틀림이 없는 쉘은 통계적 변동성이 훨씬 작은 높은 강도를 제공하므로 제품 생산 비용을 절감할 수 있다.
- 고장력으로 감겨 있고 1~2mm 두께의 격납 밴드를 사용하는 PMM 로터의 경우,

좌굴층은 발생할 가능성이 낮지만 비선형적인 성장체 거동으로 인해 예상 격납 압력의 20% 손실이 흔히 발생 한다. 최근 개발된 항공기 추진 시스템용 로터는 3K 탄소섬유 에 50lbf의 장력이 필요했으며, 이로 인해 다음과 같은 응력이 발생 했다.

	MPa	psi
Fiber stress during winding	1,958	283,930
Average hoop stress after winding	1,225	177,625
First layer hoop stress after winding	992	143,840
Last layer hoop stress after winding	1,340	194,300

그림 16. PMM 로터용 50 lbf 장력으로 3K 탄소섬유 를 감을 때 발생하는 응력. 항공기 추진 시스템용 PMM 로터 개발 과정에서 50lbf의 장력으로 3K 탄소섬유를 감을 때 발생하는 응력.

- 경화된 로터에 설치된 마지막 층의 응력은 로터가 작동 속도까지 회전함에 따라 두 배로 증가한다는 점에 유의해야 한다. 이는 로터 적용 분야가 이제 시판되는 탄소섬유의 공표된 강도에 근접하고 있음을 의미하며, 따라서 공정에 대한 정확한 이해가 필수적이다.
- 수소와 같은 압축 가스를 저장하는 압력 용기의 경우, 팽창된 맨드릴은 권선으로 인해 증가하는 계면 압력을 따라가면서 내부 금형선을 정확하게 유지해야 한다. 경우에 따라 150psi 미만의 공장 공기압으로는 주름 발생을 방지하는 데 필요한 계면 압력을 충족시키기에 불충분할 수 있다.
- 잠수정의 경우, 견뎌야 하는 수압으로 인한 최대 원주 방향 압축은 선체 내경에서 발생하며, 변형된 층 없이 제작된 선체는 내경에서 상당한 유사 자가압축(잔류 인장 응력)을 발생시켜 성능을 향상시킬 수 있다. 이는 잘 만들어진 복합재 선체가 이러한 용도에 적합하다는 것을 뒷받침한다.
- 본 민감도 분석에서 나타난 또 다른 요인은 평균 쉘 Vf가 2lbf 장력에서 80층의 경우 52.1%에서 50lbf 장력에서 80층의 경우 64.8%까지 변동했다는 점이다. 쉘 두께도 이에 비례하여 변동했다. 이러한 차이는 원료의 Vf가 생산 시점에 고정된 TP 테이프 또는 TS 토우프레그를 사용하여 권선할 때 발생하는 어려움을 보여준다.
- 습식 권선 및 열 경화 방식의 용기 제작에 있어서 맨드릴의 형상은 매우 중요하다. 흔히 발생하는 것처럼 가공된 맨드릴이 정확한 축대칭을 이루지 못하는 경우, 즉 벽 두께가 일정하지 않은 경우, 경화 과정 중 접합면에서 평형 형상이 원통형이 되지 않다. 내부 압력 또는 외부 압력을 견디도록 설계된 압력 용기의 경우, 이는 사용 중 응력 상태에 심각한 굽힘 성분(기존 구조 분석에는 포함되지 않는 하중 성분)을 포함하게 된다는 것을 의미한다.

- 첨단 복합소재는 다양한 응용 분야에서 탁월한 성능을 제공한다고 흔히 언급된다. 하지만 이와 함께 "검은 알루미늄"에 대한 경고도 따라붙는데, 이는 동일한 형상에서 등방성 금속을 단순히 복합소재로 대체하는 것만으로는 만족스러운 결과를 얻기 어렵다는 것을 의미한다. 필라멘트 와인딩 복합소재의 경우, 섬유 종류, 부품 형상 및 적층 각도를 최적화할 수 있다는 점이 큰 장점이며, 동시에 제조 공정을 설계하는 것 또한 매우 중요하다.

저자 소개

- 던컨 로리는 첨단 복합소재 전문 기업인 Lawrie Technology Inc.(LTI, 미국 펜실베이니아주 지라드 소재)를 소유 및 운영하고 있다. LTI는 고성능 섬유를 활용한 신제품 개발 외에도 구조 최적화, 유한 요소 해석(FEA) 분야의 컨설팅 서비스와 최첨단 기계 시험 시설을 제공한다.
- 로리는 리버풀 대학교에서 기계공학 학사 학위를, 영국 크랜필드 공과대학에서 항공 구조학 석사 학위를 받았다. 그는 항공우주, 풍력 터빈 분야의 응력 해석 전문가, 수석 엔지니어, 제품 개발 엔지니어, 제품 부서 엔지니어 등 다양한 분야에서 오랜 경력을 쌓았다. 또한, 그는 인력으로 움직이는 항공기를 제작하고 비행했으며, 1981년 고사머 알바트로스의 도버 해협 횡단 비행을 담당했던 크레머 상 위원회의 창립 멤버이기도 했다.

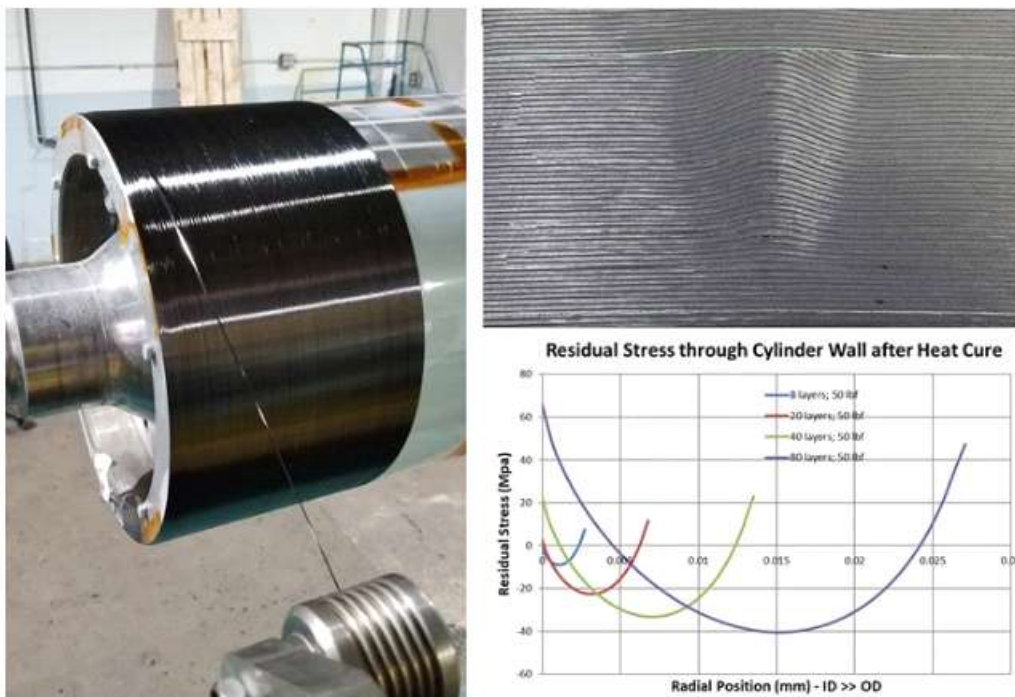


그림 17. PMM 로터 권선, 좌굴 및 잔류 응력 그래프. 출처 | 로리 테크놀로지 주식회사

□ 대한민국 UNIST, CFRP 물방울 기반 발전기 개발(26.01.07.)

※ [Composites World] UNIST 연구진은 S-FRP-DEG 시스템이 빗방울의 충격을 정확하게 전기 신호로 변환하여 배수 제어를 위한 자율적인 전원을 공급할 수 있음 검증 / News

• <https://www.compositesworld.com/news/unist-develop-cfrp-droplet-based-electricity-generator>

• <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202522178>

• #한국 #건축건설 #탄소섬유 #복합소재 #CFRP #오토메이션

• 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장

- 울산과학기술대학교 (UNIST, 울산, 대한민국) 소속 연구팀이 지붕에 떨어지는 빗방울을 이용해 전기를 생산하는 기술을 개발했다. 이 기술은 폭우 시 자동 배수 제어 및 홍수 경보 시스템에 자립형 전력 공급 방식을 제공할 수 있다.
- UNIST 기계공학과 박영빈 교수 연구팀은 탄소섬유강화폴리머(CFRP)를 이용한 물방울 기반 발전기(DEG)를 개발했다. "초소수성 섬유강화폴리머(S-FRP-DEG)"라고 불리는 이 장치는 떨어지는 빗방울의 충격을 전기 신호로 변환하여 외부 전원 없이 빗물 관리 시스템을 가동할 수 있다. CFRP 복합재는 가볍고 내구성이 뛰어나며 강도가 높고 부식에 강하기 때문에 옥상이나 기타 노출된 도시 구조물에 장기간 설치하기에 적합하다.
- 이 발전기는 정전기 발생과 유사한 과정을 통해 전기를 생산한다. 양전하를 띤 빗방울이 장치의 음전하를 띤 초소수성 표면에 닿으면, 빗방울이 빠르게 떨어져 나가면서 전기 전하가 전달된다. 이 움직임으로 인해 내장된 탄소섬유를 통해 전류가 흐르면서 거의 즉시 전력이 생성된다.
- 습기와 도시 오염 물질로 인해 부식되기 쉬운 기존 금속 기반 물방울 발생기와 달리, 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP) 기반 설계는 열악한 환경 조건에서도 안정적인 성능을 유지한다. 연구팀은 또한 표면에 질감을 부여하고 연잎에서 영감을 받은 코팅을 적용하여 발수성을 높이고 먼지와 그을음이 쌓이는 것을 방지함으로써 효율성을 더욱 향상시켰다.
- 금속으로 만들어진 기존의 물방울 발생기는 오염과 습기로 인해 부식되는 경우가 많다. UNIST 연구팀은 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 기반 장치가 이러한 문제를 해결하고 최적의 내구성과 안정성을 제공한다는 사실을 발견했다.
- 실험실 테스트에서 약 92 μ L 부피를 가진 빗방울 하나가 최대 60볼트의 전압과 수 마이크로암페어의 전류를 발생시켰다. 네 개의 장치를 직렬로 연결했을 때, 시스템은 144개의 LED 조명을 잠시 동안 작동시켜 확장성을 입증했다.

- 연구팀은 건물 옥상과 배수관에 장치를 설치하여 실제 환경에서 기술의 유효성을 검증했다. 강우 강도가 증가함에 따라 전기 신호가 더 강해지고 빈번해졌으며, 이를 통해 시스템은 약한 비, 중간 정도의 비, 강한 비를 구분하고 필요에 따라 배수 펌프를 자동으로 작동시킬 수 있었다.
- 박 교수는 “이 기술은 도시 기반 시설이 빗물의 에너지 자체만을 이용하여 강우량을 모니터링하고 홍수 위험에 대응할 수 있도록 해준다”며, “앞으로 탄소섬유 복합재가 이미 널리 사용되고 있는 차량이나 항공기 등 모빌리티 시스템에 더욱 통합될 수 있을 것”이라고 말했다.
- 이 연구는 이성환 박사와 김재진 박사가 제1저자로 참여하여 주도했다. 한국과학기술정보통신부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이 연구는 2025년 11월 20일 온라인 학술지 'Advanced Functional Materials'에 게재되었다.

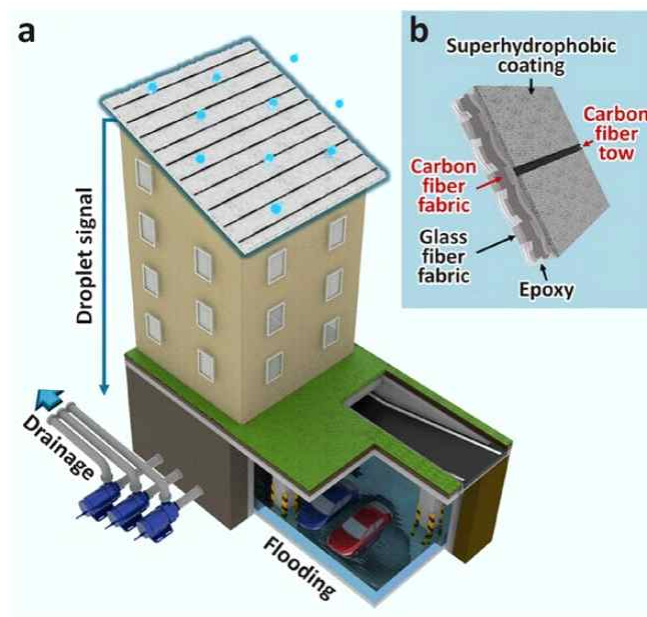


그림 18. S-FRP-DEG의 구조 및 작동 메커니즘. 출처 | Advanced Functional Materials (2025)

□ 미국 Cambium, 1억 달러 규모 시리즈 B 투자 유치로 제품 파이프라인 및 소재 제조 역량 강화(26.01.07.)

※ [Composites World] 추가 자금 조달을 통해 Cambium AI 기반 소재 발굴 및 제조 엔진을 신속하게 확장하여 개발 기간을 수십 년에서 수년으로 단축 가능/ News

• <https://www.compositesworld.com/news/cambiums-100-million-series-b-accelerates-product-pipeline-materials-manufacturing>

• #미국 #항공우주 #방어

• 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장

- 1월 5일, Cambium(미국 캘리포니아주 엘세군도 소재)은 8VC가 주도하고 MVP Ventures, Lockheed Martin Ventures, GSBackers, Veteran Ventures Capital, J17 Ventures, Vanderbilt University, Alumni Ventures, Gaingels, Inevitable Ventures, JACS Capital, Jackson Moses 및 기타 개인 투자자, 패밀리 오피스가 참여한 1억 달러 규모의 시리즈 B 투자 유치를 발표했다.
- 이번 투자 유치를 통해 Cambium은 미국과 유럽에서 제품 개발 및 소재 제조를 가속화하여 항공우주, 방위, 에너지, 해양, 모터스포츠 및 기타 고성능 분야의 고객을 지원할 것이다.
- Cambium은 인공지능, 화학 정보학, 고성능 컴퓨팅을 융합하여 기존 방식보다 수백 배 빠른 속도로 새로운 단량체와 중합체를 설계한다. 이렇게 설계된 소재는 자체 개발한 항공우주 인증 설비를 활용하여 제조, 테스트 및 대량 생산함으로써 개발 피드백 속도를 높인다.
- 2025년 12월 SHD Composites를 인수 하면서 Cambium은 미국, 영국, 유럽에 걸쳐 항공우주 및 산업용으로 인증된 프리프레그, 필름, 접착제 소재를 대규모로 생산할 수 있는 역량을 갖추게 되었으며, 각 지역마다 안정적인 공급망을 구축하고 있다.
- Cambium은 고객에게 (a) 시제품 및 소량 생산을 며칠 만에 신속하게 완료할 수 있는 유연성과 (b) 여러 지역에 동일한 제조 시설을 활용하여 즉시 생산량을 확대할 수 있는 능력을 제공함으로써 진정한 공급망 안정성을 보장한다.
- "이번 시리즈 B 투자 유치는 국방 및 산업 기반에 필요한 핵심 소재 제조를 재산업화하는 Cambium의 모델이 옳았음을 크게 입증하는 것이다."라고 Cambium의 공동 창립자 겸 CEO인 사이먼 워딩턴은 말했다.
- Cambium의 개발 플랫폼은 첨단 복합소재부터 광학 보호 시스템에 이르기까지 다

양한 소재 분야를 아우릅니다. 최근 상용 출시된 제품에는 초고온 폴리머와 탄소-탄소(C/C) 열 보호 시스템(TPS)이 포함된다.

- 예를 들어, ApexShield 1000 수지는 고체 로켓 엔진(SRM)부터 극초음속 활공체에 이르기까지 다양한 용도의 복합재 부품 제작 속도 향상을 목표로 한다. 후기 시험 단계에 있는 다른 제품으로는 SRM용 가공 준비가 완료된 복합재 빌릿과 일상적인 조건과 극한 조건 모두에서 뛰어난 성능을 발휘하도록 설계된 항공기 및 우주선 구조물용 금속-복합재 접착제가 있다. 이 외에도 광학 및 지향성 에너지 보호 장치부터 고온 발포체에 이르기까지 다양한 제품들이 개발 중이며, 각 제품은 고분자 혁신과 표준 제조 공정이라는 공통 플랫폼을 기반으로 한다.
- 주요 사업 분야에서 국방 파트너들과 계약을 진행 중이며, 각 계약은 이중 용도 적용이 가능하기 때문에, Cambium은 육상, 해상, 공중 및 우주 분야의 혁신가들에게 가장 신뢰받는 첨단 소재 파트너로 빠르게 부상하고 있다(자세한 내용은 "미 해군, 극초음속용 Cambium C/C 복합재 개발 계약" 참조).
- 워딩턴은 "우리는 미국, 영국, 유럽 전역에 걸쳐 분산형 보안 제조 네트워크를 확장하고 있으며, 파트너들이 요구하는 속도, 규모 및 탄력성을 충족하도록 설계된 서구 첨단 소재 플랫폼을 구축하고 있다."라고 말했다.



그림 19. 출처 | 게티 이미지(위) 및 야닉 빌레민/컨소시엄(아래)

□ 미국 아치형 콘크리트 SIP 거푸집 시스템에 대한 세 번째 특허 출원(26.01.08.)

※ [Composites World] 건설 분야 콘크리트 구조물 보강을 위한 아치형 고정식 철근 콘크리트(SIP) 시스템 상용화 단계 진입/ News

- <https://www.compositesworld.com/news/third-patent-is-issues-for-contech-sip-form-work-system>
 - #미국 #건축건설 #복합소재 #재활용
 - 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장
-
- ST Bungalow LLC(미국 뉴욕주 개리슨)와 Molinelli Architects(미국 뉴욕주 브라이 어클리프 매너)가 개발한 아치형 고정식(SIP) 복합재 거푸집 시스템에 대한 또 다른 특허가 미국 특허상표청(USPTO)에서 승인되었다.
 - 지난 10년간 발명가인 마이클 몰리넬리와 아쇼크 차우다리는 관련 특허를 개발해 왔으며, 특히 최근 2년간은 2024년 10월에 수여된 미국 특허를 기반으로 연구를 진행해 왔다.
 - 해당 특허 포트폴리오의 첫 번째 특허는 2015년 에, 두 번째 특허는 2016년 에 등록되었다. 이번 발표로 세 번째 특허(미국 특허 번호 12,516,522 B2)가 추가되었으며, 이 특허는 콘크리트 평판/구조물 제작의 핵심 개념 및 추가 재료를 포괄한다.
 - 이 특허는 콘크리트 구조물(예: 바닥, 지붕, 교량 상판)에 고정되어 아치나 돔과 같은 기하학적 형태를 이용하여 높은 압축 강도를 구현하는 콘크리트 보강 시스템에 관한 것이다. 이러한 압축 강도 향상은 구조물의 전반적인 강도를 크게 높이는 동시에 필요한 콘크리트 양을 줄여준다.
 - SIP 거푸집 시스템은 풍력 터빈 블레이드에서 추출한 복합소재와 플라스틱 병 등 100% 재활용 소재로 만들어져 필요한 인장 강도를 충분히 제공하며, 압축력 또한 확보한다. 따라서 철근이나 데크재가 필요하지 않다.
 - 이 기술은 비용이 많이 들고 노동 집약적인 철근(또는 FRP 철근), 강철 데크 및 콘크리트를 대체함으로써 인건비, 자재비 및 운송비를 절감하여 비용 절감 효과를 제공한다. 또한 구조물의 탄소 배출량도 감소한다.

ConTech의 주요 이점

- 작업자의 안전성을 향상시켜 준다. 기존의 철근은 복합소재나 플라스틱으로 완전히 대체되며, 거푸집의 끝부분이 날카롭지 않아 복잡하고 위험한 작업이 줄어든다. 거푸집 공사 비용만 해도 콘크리트 슬래브 비용의 30~60%를 차지한다.

- 각 형태의 상당 부분이 재활용 재료로 만들어져 재료비가 저렴하며, 이는 순환 경제를 촉진한다.
- 기후 조건이나 균열로 인해 습기가 철근 및 데크에 악영향을 미치는 상황에서 특허받은 시스템은 추가적인 이점을 제공한다.
- 모델링 결과 300 PSF의 활하중 용량이 가능한 것으로 나타났는데, 이는 주거용 및 상업용 건물의 표준 활하중 요구 사항인 40 PSF 및 100 PSF를 훨씬 웃도는 수치이다.
- "아치나 볼트 같은 기하학적 구조를 콘크리트 보강에 활용하는 아이디어는 로마 시대만큼이나 오래됐다."라고 ST Bungalow LLC의 설립자이자 공동 발명가인 차우다리는 말한다. "하지만 철근 대신 콘크리트 평판 보강에 이를 사용하는 것은 놀랍게도 새로운 발상이다."
- 파트너사들에 따르면 상업적 전망은 매우 밝다. SIP 거푸집 시스템은 데이터 센터를 건설하는 업체나 교량과 같은 기타 인프라 건설 업체들에게 특히 큰 관심을 끌 것으로 예상된다.
- Molinelli Architects와 ST Bungalow LLC는 현재 특허 기술의 라이선스 및 상용화를 위해 논의 중이며, 관련 문의를 환영한다.



그림 20. ConTech의 기능을 보여주는 17.25(길이) × 3.75(너비) × 4(높이) 인치 크기의 축소 모형이 PETG 소재와 30% 재활용 풍력 터빈 블레이드 소재를 사용하여 출력되었다. 출처 | 메인 대학교

□ 독일 IFW, AFP 사용해 복잡한 복합 샌드위치 구조 구현(26.01.08.)

※ [Composites World] SHOREliner 프로젝트는 위상 최적화된 항공기 동체 구조의 자동화된 제조를 시연하며 디지털 공정 체인 보고/ News

- <https://www.compositesworld.com/news/ifw-realizes-complex-composite-sandwich-structures-with-afp>
- #독일 #항공우주 #탄소섬유 #프로세스 #에폭시 #복합소재 #핵심 #수지 #열가소성 수지 #ATL/AFP #프로젝트
- 저자 : 진저 가드너, CompositesWorld 수석 기술 편집자

- 독일 하노버 라이프니츠 대학교 생산공학 및 공작기계 연구소(IFW, Institute for Production Engineering and Machine Tools at Leibniz University Hannover)의 연구원들은 자동 섬유 배치(AFP) 기술을 이용하여 고도로 복잡하고 위상 최적화된 탄소섬유 강화 폴리머(CFRP) 샌드위치 구조를 완전 자동화 방식으로 제조하는 데 성공했다.

- SHOREliner 프로젝트의 일환으로 개발된 이 구조물은 전기 항공기의 고하중 동체 부분에 대한 기능적 실증 장치 역할을 하며, 브라운슈바이크 공과대학교 항공기 설계 및 경량 구조 연구소(IFL Institute of Aircraft Design and Lightweight Construction, 독일 브라운 슈바이크)와의 협력을 통해 위상 최적화, 재료 모델링 및 제조 계획을 연결하는 연속적인 시뮬레이션 기반 디지털 프로세스 체인을 사용하여 설계되었다.

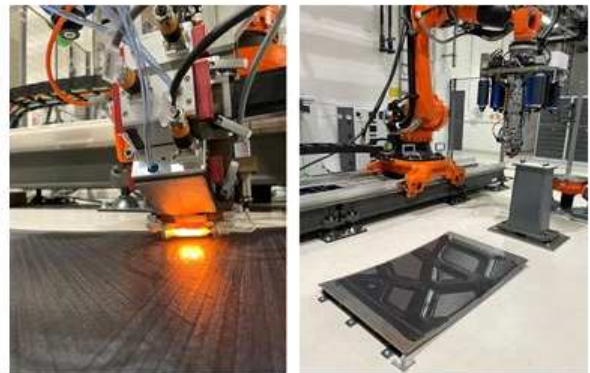


그림 21. IFW의 SHOREliner 프로젝트에서 항공기 동체에 대한 AFP 프로세스. 독일 가르브센에 위치한 SCALE의 IFW 셀을 활용한 SHOREliner 프로젝트의 항공기 동체 제조 공정. 출처 | phi magazine

- 2026년 1월 phi 매거진 에 실린 크리스토퍼 슈미트와 막시밀리안 카체미르츠크의 기사에 설명된 바와 같이, 이 시제품은 AFP(자동 적층 제조) 기술을 사용하여 열경화성 프리프레그 테이프를 성형 틀에 배치하여 내부 스킨을 제작한 후, 통합 보강 요소를 위한 폼 코어를 정밀하게 배치하고 외부 스킨 플라이를 자동 적층하여 제작되었다.
- 오토클레이브 경화 후, 결과적으로 얻어진 격자 기반 샌드위치 구조는 강성 대 질량비가 크게 향상되고 높은 기하학적 정확도를 보여주었으며, 이는 기하학적으로 까다로운 동체 응용 분야에서 AFP 기술의 유효성을 입증하고 완전 디지털화된 설계-제조 워크플로의 실현 가능성을 확인시켜 주었다.
- IFW의 TheSaLab 프로젝트는 이러한 연구를 바탕으로 레이저 기반 AFP(Advanced

Forming Process) 및 현장 경화 공정을 통해 제조된 열가소성 시스템으로 열경화성 샌드위치 구조를 대체하는 것을 목표로 한다.

- 오토클레이브 경화 공정을 제거하고 배치 과정에서 직접 접합을 가능하게 함으로써, 이 접근 방식은 공정 시간 단축, 에너지 소비 감소 및 재활용성 향상을 목표로 한다. 주요 연구 분야는 레이저 기반 열 공정 제어, 열가소성 표면 시트와 폼 코어 간의 접합 메커니즘, 그리고 결과적으로 생성되는 샌드위치 구조의 기계적, 환경적 및 경제적 평가를 포함한다.
- SHOREliner와 TheSaLab은 협력하여 미래 모빌리티를 위한 경량, 내구성 및 지속 가능성이 뛰어난 복합 구조물의 확장 가능하고 자동화된 생산을 위한 기술적 기반을 구축한다.



그림 22. IFW에서 AFP를 사용하여 제작한 코어 복합 샌드위치 구조. 출처 | IFW, phi 매거진

SHOREliner 프로젝트

- 기후 중립적인 섬유 복합재 항공기 개발, 우수한 공기역학적 특성 및 단거리 이착륙(STOL) 성능, 다목적 통근 항공기로의 활용 가능성 제시



그림 23. MD Aircraft의 eViator 항공기. 출처 | MD 그룹

- SHOREliner 프로젝트에서 IFW는 컨소시엄 파트너인 MD Aircraft(독일 프라이데부르크)의 100 % 배터리 전기 항공기 MDA1 eViator 의 CO₂ 중립적이고 자원 효율적인 양산 기반을 개발하고 있다. 특히 중소기업(SME)의 경우 제조 관련 사항은 종종 개발 후반부에 고려되어 비용이 증가하는 경향이 있다. 따라서 IFW는 디지털 트윈과 제조 가능성 분석을 활용한 다학제적 접근 방식에 집중하여 개발 초기 단계부터 공정 체인을 최적화함으로써 개발 기간을 단축하고 자원 소비를 줄이는데 주력하고 있다.

- 팀: Tim Tiemann, David Garthe
- 자금: BMW(LuFo VI-3)
- 기간: 2023년 1월 ~ 2026년 12월

TheSaLab

- 레이저 기반 현장 열가소성 AFP 이용한 열가소성 샌드위치 구조 제조 기본 원리

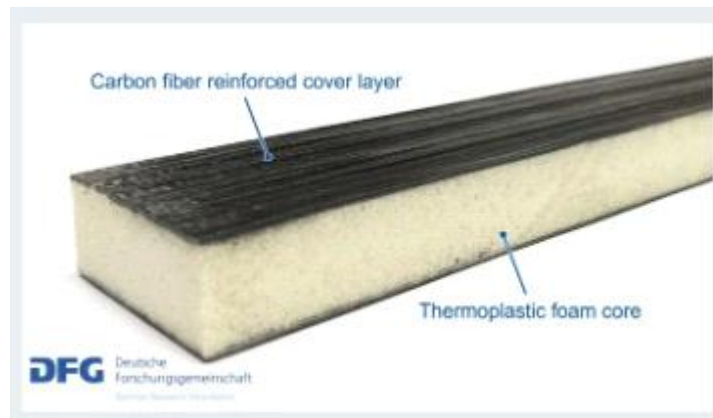


그림 24. IFW의 TheSaLab 프로젝트의 일환으로 제작된 CFRP 폼 샌드위치 구조. 출처 | IFW

- 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 구조물은 높은 비강도로 인해 경량화에 매우 유리한 잠재력을 지니고 있다. 열경화성 복합소재에서 열가소성 복합소재(TPC)로의 전환은 이러한 재료의 재활용성과 매트릭스의 부분적인 용융을 통한 용접으로 부품 접합이 가능하다는 장점 때문에 점차 가속화되고 있다. 특히 샌드위치 구조는 기계적 특성 대비 무게 비율이 매우 우수하여 연구 및 구현이 활발히 진행되고 있다.

- 팀: 크리스토퍼 슈미트
- 자금 지원: 독일 연구재단(DFG)
- 기간: 2023년 10월 ~ 2026년 10월