

'26.5.18.~26.05.24. 글로벌 탄소산업 주요 동향

□ 미국 Century Tool, 현장에서 열가소성 복합재 시험 기능 추가 (26.05.18.)

※ [Composites World] 적외선 오븐에 투자하면 자동차 및 항공우주 산업과 같은 분야에서 유리섬유 매트 열가소성 수지(GMT) 및 기타 복합재 가공에 대한 포괄적인 시험이 가능해진다. / News

- <https://www.compositesworld.com/news/century-tool-adds-thermoplastic-composites-trial-capabilities-on-site>
- <https://toolingtechgroup.com/companies/century-tool/>
- <https://www.blasdel.net/>
- <https://www.compositesworld.com/news/tooling-tech-group-acquires-century-tool->
- #미국 #금형/공구 #탄소섬유 #유리섬유 #열가소성 수지
- 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장

○ Tooling Tech Group의 사업부인 Century Tool(미국 미시간주 펜턴)은 유리섬유 매트 열가소성 수지(GMT) 가공 능력을 확장하고 현장에서 종합적인 복합재 틀링 시험을 가능하게 하기 위해 Blasdel Electric(미국 인디애나주 그린스버그)에서 맞춤형 제작한 적외선 오븐 시스템을 추가했다.

○ Tooling Tech Group의 CEO인 리 칠더스는 "이번 투자는 복합재 제조 분야의 선두 자리를 유지하겠다는 당사의 의지를 반영한다."라고 말했다. "첨단 열가소성 수지로의 전환이 가속화되고 있으며, 당사는 고객이 위험 부담 없이 신속하게 대응할 수 있도록 지원하고자 한다. 이러한 역량을 자체적으로 확보함으로써 Century Tool과 Tooling Tech Group은 고객사가 프로그램 규모를 확장할 때 가장 먼저 찾는 파트너가 될 수 있을 것이다."

○ 에너지 효율이 뛰어난 이 시스템은 복합 소재 블랭크를 열성형에 최적화된 정밀하고 균일한 온도로 빠르게 가열하여 Azdel, PEEK, 탄소섬유가 함유된 PEKK를 비롯한 다양한 엔지니어링 열가소성 및 열경화성 소재를 지원한다.

○ Century Tool의 1,500~3,000톤급 프레스 설비와 결합된 이 시스템을 통해 고객은 생산 현장에 투입하기 전에 자체적으로 틀링 성능을 검증할 수 있어 위험을 줄이고 제품 출시 기간을 단축할 수 있다.



그림 1. 출처 | Century Tool

□ 독일 Biesterfeld, 대한민국 OSP 과반수의 지분 인수(‘26.05.18.)

※ [Chemie] 유통업체, 첨단 산업 분야에서 지리적 확장 지속 / News

- <https://www.chemie.de/news/1188711/ki-verlaengert-die-batterielebensdauer-von-e-autos-um-23-ohne-die-schnellladung-zu-verlangsamen.html>
- #독일 #특수화학제품 #고분자 #시장
- Biesterfeld(독일 함부르크)는 산업용 특수화학제품 및 고분자 제품 유통 분야의 대한민국 기업인 OSP(한국 경기도 광명)의 지분 과반수를 인수했다. 창립자인 김대우 회장은 합작 투자 파트너로서 회사에 계속 참여할 예정이다. 이번 계약은 지난 5월 12일에 체결되었다.
- 1993년에 설립된 OSP는 폴리우레탄, 코팅 및 접착제, 폴리머, 복합재료, 전자 산업용 특수 화학제품의 원료 및 첨가제를 공급하는 전문 유통업체이다. Dow(독일), DuPont(미국), Evonik(미국), BASF(독일), Celanese(미국)와 같은 기업들과의 오랜 파트너십을 통해 자동차, 해양, 전자, 소비재 등 다양한 첨단 산업 분야에 제품을 공급하고 있다.

고객에게 제공하는 부가가치에 집중

- 이 합작 투자는 컨설팅, 선정, 시험, 검증 및 특정 기술 요구 사항을 충족하는 맞춤형 재료 솔루션 구현을 통해 고객에게 실질적인 부가가치를 제공하는 것을 목표로 한다.
- Biesterfeld의 CEO인 스테판 글란더는 “OSP의 창립자이자 오너인 김대우 회장이 우리를 신뢰해주고, 특수화학 및 고성능 소재라는 까다로운 시장에서 양사의 강점을 결합할 수 있는 기회를 줌에 감사한다. 이번 합작 투자를 통해 고객 중심적인 접근 방식을 더욱 확대하고, 기술적으로 까다로운 산업 분야에서의 입지를 강화해 나갈 것이다.”라고 밝혔다.
- OSP의 설립자이자 소유자인 김대우 회장은 “Biesterfeld와의 합작 투자를 매우 기쁘게 생각한다. Biesterfeld는 120년의 기술 컨설팅 경험과 산업 응용 분야에 대한 뛰어난 전문성을 바탕으로 OSP의 차세대 발전 단계에 이상적인 파트너이다.”라고 덧붙였다.



그림 2. 출처 | 생성형AI

□ 스웨덴 찰머스 공대, AI 기술로 전기차 배터리 수명을 23% 연장하면서도 고속 충전 속도 유지(26.05.19.)

※ [Chemie] 연구원들은 배터리의 전기화학적 특성에 대한 인공지능 모델을 훈련시켜 배터리 상태에 따라 충전 전류를 조절하는 방법을 연구하고 있다. / News

- <https://www.chemie.de/news/1188711/ki-verlaengert-die-batterielebensdauer-von-e-autos-um-23-ohne-die-schnellladung-zu-verlangsamen.html>
- <https://www.chemie.de/news/1160764/lithium-akkus-unter-der-lupe.html>
- #스웨덴 #전기자동차 #인공지능 #리튬이온배터리 #배터리수명

- 고속 충전은 차량 배터리의 수명을 단축시키지만, 전기차의 장거리 주행에는 필수적이다. 스웨덴 찰머스 공과대학교 연구진은 배터리 상태에 맞춰 고속 충전 방식을 조절하는 새로운 인공지능(AI) 기술을 개발했다. 연구 결과, 충전 시간을 늘리지 않고도 배터리 수명을 최대 23%까지 연장할 수 있는 것으로 나타났다. 이 기술은 차량 소프트웨어 업데이트만으로 구현가능하다.
- 개인이나 기업이 전기차 구매를 고려할 때, 급속 충전 가능 여부는 중요한 요소이다.
- "택시나 대형 산업용 차량의 경우 급속 충전소 접근성이 매우 중요하지만, 승용차도 마찬가지이다. 자가용 소유자들은 보통 집에서 전기차를 충전하지만, 집 밖에서 급속 충전소를 이용할 수 있는지는 출퇴근이나 장거리 운전을 편리하게 해 주기 때문에 매우 중요한 요소이다."라고 찰머스 공과대학 전기공학과 창푸 조우 교수는 말한다.
- 현재 전기차 배터리의 수명은 사용량과 충전 방식에 따라 약 8~15년이다. 유럽 전기차 시장에 대한 여러 연구에 따르면 전기차 구매를 고려하는 소비자들이 배터리 수명의 한계에 대해 우려하고 있는 것으로 나타났다.
- 효율적인 고속 충전에 대한 수요는 배터리 수명과 상충되는데, 이러한 충전 방식은 배터리에 스트레스를 주고 수명을 단축시키기 때문이다.
- 창푸 조우는 뉴질랜드 빅토리아 대학교 조교수이자 찰머스 공과대학교의 전 연구원이었던 멩 위안과 함께 이 문제에 도전했다. 최근 발표된 연구에서 그들은 인공지능을 활용하여 충전 속도를 크게 높이지 않고도 배터리 수명을 연장할 수 있음을 입증했다.

배터리 상태에 맞춰 충전 과정을 조정한다.

- 이번 연구에서 연구진은 배터리의 화학적 구성과 "상태"에 따라 고속 충전 시 전류

를 조절하는 AI 기반 충전 전략을 제시한다. 이러한 맞춤형 충전 방식은 기존 표준 방식보다 배터리 수명을 약 23% 연장시켜 준다. 동시에 충전 시간은 몇 초 정도를 제외하고는 변함이 없다.

- "우리는 현재와 거의 같은 속도로 충전하면서도 배터리에 장기적인 손상을 훨씬 줄일 수 있다는 것을 보여주고 있다."라고 멩 위안은 말한다.
- 배터리를 급속 충전할 때, 여러 셀에 높은 전류가 흐르게 되는데, 이는 화학적 부반응의 위험을 증가시키는 요인 중 하나이다. 가장 문제가 되는 현상 중 하나는 소위 리튬 석출인데, 이는 급속 리튬이 배터리 구조에 제대로 통합되지 않고 전극 표면에 침착되는 현상이다. 이러한 현상은 용량을 감소시킬 뿐만 아니라 안전성에도 문제를 일으킬 수 있다. 리튬 구조의 불규칙성은 최악의 경우 단락을 유발할 수 있기 때문이다.
- "배터리 수명이 다할수록 리튬 석출 위험이 증가한다. 하지만 오늘날 일반적인 충전 방식에서는 배터리가 새것이든 수년간 사용된 것이든 동일한 전류와 전압이 사용된다."라고 멩 위안은 말한다.

충전 시간이 짧고 마모가 적다.

- 새로운 AI 기반 충전 전략은 강화 학습을 기반으로 하며, 올바른 행동에 보상을 제공하여 행동을 강화한다. 학습 환경은 시중에서 가장 흔히 볼 수 있는 전기차 배터리 모델과 충전 시간 및 배터리 상태에 영향을 미치는 매개변수 시뮬레이션으로 구성되었다.
- 이 AI 모델은 충전 당시 배터리의 충전 또는 방전 상태에 따라 충전 과정을 조절하도록 훈련되었다. 또한 배터리의 전반적인 상태도 고려해야 했는데, 이는 배터리 용량과 전기화학적 특성 모두에 매우 중요하기 때문이다. 그 결과, 유해한 반응을 최소화하면서 충전 시간을 단축하는 충전 전략이 개발되었다.
- "우리 연구에 따르면 배터리의 변화하는 전기화학적 상태를 고려하여 충전 과정 중 전류를 지능적으로 조절하면 배터리의 성능과 수명을 모두 극대화할 수 있다."라고 창푸 조우는 말한다.

구현은 쉽지만, 사용자 정의가 필요하다.

- 연구진에 따르면, 새로운 충전 전략은 구현이 간단하고 비용 효율적이다. 원칙적으로 차량 배터리 관리 시스템의 소프트웨어 업데이트를 통해 구현할 수 있다. 하지만 이 방법을 널리 적용하기 위해서는 몇 가지 조정이 필요하다.
- "오늘날 배터리 종류가 그렇게 많지는 않지만, 누구나 사용할 수 있도록 방법을 보정해야 한다. 전이 학습을 활용하면 AI 모델이 이미 학습한 내용을 바탕으로 새로

운 배터리에 더욱 빠르게 적응시킬 수 있다."라고 창푸 조우는 말한다.

- 다음 단계는 해당 방법을 실제 배터리에 직접 적용하여 테스트하는 것이다. 연구진은 AI 기반 충전 전략이 교통 부문의 전동화에 크게 기여할 것으로 기대하고 있다.
- "배출량을 줄이고 화석 연료 없는 사회로 전환하기 위해서는 사람들이 전기 자동차로 전환하려는 의지가 중요하다. 빠른 충전과 더 긴 배터리 수명은 중요한 원동력이다."라고 멩위안은 말한다.
- "자동차 산업의 경우, 배터리 수명이 거의 23% 더 길어지면 보증 비용 절감, 중고차 가격 상승, 그리고 중요한 원자재의 보다 효율적인 사용을 의미할 수 있다."라고 창푸 조우는 말한다.



그림 3. 출처 | AI 생성

□ 스웨덴 찰머스 공대, EU 규제로 인해 화석연료 없는 항공유 생산이 불필요한 비용 및 에너지 소비 증가 우려(26.05.20.)

※ [Chemie] EU 규정으로 인해 화석 연료를 사용하지 않는 항공 연료가 불필요하게 비싸지고 에너지 소비가 많아질 수 있다. / News

• <https://www.chemie.de/news/1188720/eu-vorschriften-koennten-fossilfreie-flugtreibstoffe-unnoetig-teuer-und-energieintensiv-machen.html>

• #EU #에너지효율 #합성연료 #기후목표 #수소

○ 이란 전쟁이 석유 시장에 미친 영향으로 EU의 화석 연료를 사용하지 않는 항공 연료의 국내 생산 계획에 대한 관심이 다시금 높아졌다. 그러나 합성 항공 연료에 대한 EU 규정은 필요 이상으로 비용이 많이 들고 에너지 집약적인 생산 경로로 개발을 유도하여 기후 목표 달성을 저해할 위험이 있다. 이는 스웨덴 찰머스 공과 대학교에서 합성 메탄올 생산의 다양한 방법을 분석한 최근 연구 결과이다.

○ 작년에 EU 공항에서는 최소 2%의 지속 가능한 항공 연료 혼합을 의무화하는 규정이 도입되었다. 이 혼합 비율은 점진적으로 증가하여 2050년까지 최소 70%에 도달할 것으로 예상된다. 그때까지 지속 가능한 항공 연료의 절반은 RFNBO(비생물학적 원료에서 추출한 재생 가능 연료)로 구성되어야 한다. RFNBO는 재생 가능한 수소와 포집된 이산화탄소로 생산되는 합성 연료, 즉 전기 연료이다.

○ 찰머스 공과대학교 연구진은 RFNBO 규정이 합성 연료 생산 과정에서 "우회 경로"를 이용하도록 유도하여 비용과 에너지 소비를 모두 증가시킬 수 있음을 보여주었다.

○ "규제는 산업계의 기술 투자뿐만 아니라 연구 개발 우선순위에도 영향을 미친다. 가장 효율적인 솔루션을 향한 혁신을 촉진하는 대신, 자원 효율성이 떨어지는 생산 방식에 매몰될 위험이 있다."라고 찰머스 공과대학 에너지 기술학과 교수이자 해당 논문의 공동 저자인 헨릭 툰만은 말한다.

○ 향후 수십 년 동안 지속 가능한 항공 연료에 대한 수요가 증가함에 따라 전 세계적으로 수천 개의 새로운 시설이 필요할 것이다. 이를 위해서는 수명이 긴 플랜트에 대한 막대한 투자가 필요하다.

동일한 원료를 사용하여 동일한 제품을 생산하는 여러 대체 경로 간 상당한 차이 존재

○ 찰머스 연구팀은 지속 가능한 항공 연료로 전환될 수 있는 연료 분자의 한 예인 합성 메탄올 생산을 연구했다. 이는 이러한 연료 분자 제조 과정에서 다양한 생산 방식이 자원 소비에 미치는 영향을 분석하는 데 있어 대표적인 사례이다.

- 이러한 고에너지 분자는 화학 공정을 통해 탄소 원자와 수소를 결합하여 생산할 수 있다. 이번 연구에서 연구진은 바이오매스, 즉 생물 기원 탄소에서 유래한 탄소 원자를 사용하는 세 가지 메탄올 생산 방식을 비교했다. 두 가지 공정은 바이오매스 연소를 기반으로 하며, 이 과정에서 이산화탄소를 연소 가스에서 분리한 후 전기를 사용하여 별도로 생산한 수소와 혼합한다. 세 번째 공정은 가스화를 기반으로 하며, 가열된 바이오매스를 탄소와 수소를 모두 포함하는 합성 가스로 직접 변환한다.
- 세 가지 생산 방식 모두 기술적으로 실현 가능하며, 원료와 최종 제품이 동일할 수 있다. 그러나 에너지 소비량, 비용 및 전력 요구량 측면에서 상당한 차이가 있다.

직접 생산 방식은 EU 규정으로 인해 불리한 입장

- "분석 결과, 가스화 방식이 가장 자원 효율적인 선택으로 나타났으며, 두 가지 연소 기반 방식보다 생산 비용이 최대 46% 낮고 전력 소비량도 30% 적었다. 이러한 차이는 바이오매스를 먼저 이산화탄소로 연소시킨 후, 막대한 양의 전력과 수소를 사용하여 다시 연료 분자로 변환하는 과정에서 상당한 에너지 손실이 발생할 수 있음을 보여준다."라고 찰머스 공과대학 물리자원이론 연구원이자 해당 논문의 제 1저자인 요한나 베이론은 말한다.
- 그럼에도 불구하고, EU의 법적 체계는 가스화보다 연소를 훨씬 더 선호한다. RFNBO(연료 기반 비연료) 범주는 현재 거의 0%에서 2050년까지 EU 전체 항공 연료의 35%까지 증가할 것으로 예상되는데, 이 범주에는 연소 기반 대체 연료가 모두 포함되지만 가스화로 생산된 연료의 약 절반은 제외된다.
- 그 이유는 RFNBO 연료는 가스화처럼 바이오매스에서 직접 추출한 에너지와 탄소 원자를 사용하여 생산할 수 없기 때문이다. 반면, 바이오매스를 다른 에너지원으로 사용할 때 발생하는 이산화탄소를 분리하는 조건이라면 연소 기반 공정에서 바이오매스의 탄소 원자를 사용하는 것은 허용된다. 한 예로 열병합 발전소에서 임업 폐기물을 연소하는 것을 들 수 있다. 하지만 이러한 잔류 물질은 가스화를 통해 더욱 자원 효율적으로 활용될 수 있다.
- "우리가 조사한 연소 기반 대안 중 하나는 열병합 발전소에서 사용하는 공정이었다."라고 요한나 베이론은 말한다. "이 공정은 가스화보다 비용 효율적이고 에너지 효율도 높다. 예를 들어 연소 공정이 제공할 수 있는 지역 난방을 대체하는 데 필요한 추가 전력을 고려하더라도 마찬가지이다."

해당 규정은 오히려 그 목적에 반할 위험 존재

- RFNBO 분류의 목표 중 하나는 재생 에너지를 이용한 전력 생산을 촉진하여 친환경 수소를 생산하고, 한정된 자원인 바이오매스에 대한 의존도를 줄이는 것이다.

- 하지만 합성 항공 연료에 필요한 탄소 원자는 어딘가에서 공급받아야 한다. 바이오매스는 RFNBO 생산에 가장 비용 효율적인 화석 연료를 사용하지 않는 탄소 공급 원일 가능성이 높으며, 연구자들은 현행 규제 체계로 인해 바이오매스 연소로 인한 이산화탄소 수요가 매우 높아질 것으로 예상한다. 바이오매스 수요를 줄이는 대신, EU 규제로 인해 제한된 바이오매스 자원의 에너지 효율이 떨어지는 방식으로 사용될 위험이 있다.
- 헨릭 툰만은 “법적 틀이 다양한 시스템이 에너지와 자원을 얼마나 효율적으로 사용하는지를 충분히 고려하지 않고 있다”며, “따라서 이번 연구는 EU 에너지 및 산업 정책의 구조적 문제점을 지적한다. 지속 가능한 연료의 정의가 근본적인 에너지 원칙이나 EU의 광범위한 자원 효율성 목표와 일치하지 않으면 규제가 그 목적에 역행할 위험이 있다”고 말했다.

효과적인 전환을 위해서는 상황에 맞춘 규정 필요

- 연구진은 이번 연구 결과가 현재 사용 가능한 기술과 시스템에 대한 더 깊은 이해에 기여하기를 기대한다.
- 요한나 베이론은 “EU 규정이 가장 효율적인 대안에 대한 명확한 인센티브를 제공하지 않는다는 점이 놀랍다”며, “현행 법적 체계는 연소 기반 에너지 시스템에 대한 의존을 고착화할 위험이 있는데, 가스화나 지역난방의 전력화와 같이 에너지 소비와 비용을 모두 낮출 수 있는 기술적으로 성숙한 공정들이 이미 존재함에도 불구하고 그렇다”고 지적했다.
- “이번 연구는 EU가 장기 목표를 달성하려면 법적 틀의 일부를 수정해야 할 가능성이 높다는 것을 보여준다.”라고 헨릭 툰만은 말한다. “기후 목표, 자원 효율성, 산업적 타당성 간의 더 나은 조화가 현재의 불확실성을 해소하는 데 필요하다. 이러한 불확실성 때문에 향후 지속 가능한 항공 연료의 대규모 개발을 위한 합리적인 투자 결정을 내리기가 어렵다.”



그림 4. 출처 | AI 생성

□ 미국 연구진, 고효율 저비용 탄소섬유 개발(26.05.20.)

※ [Composites World] 탄소섬유 설계 프로젝트는 풍력 및 기타 산업 분야에서 요구되는 압축 성능을 충족하도록 최적화된 비원형 형상의 섬유를 개발하고 상업 파트너와 협력하여 대량 생산하는 것을 목표로 한다. / Article

- <https://www.compositesworld.com/articles/doe-funded-researchers-developing-high-throughput-low-cost-carbon-fiber->
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135983682500071X?via%3Dihub>
- #미국 #풍력/에너지 #제조생산 #탄소섬유 #복합소재 #비용효율 #전구체
- 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장

- 탄소섬유 복합재는 다양한 분야에 적용되고 있지만, 많은 연구 및 산업계에서는 특정 산업 분야의 비용, 생산 속도 및/또는 성능 요구 사항을 충족하기 위해 탄소 섬유 생산을 더욱 최적화하는 노력을 지속하고 있다. 이러한 노력 중 하나가 탄소 섬유 설계 프로젝트이다.
- 2020년부터 오크리지 국립 연구소(ORNL, 미국 테네시주 오크리지)가 주도하고 샌디아 국립 연구소(미국 뉴멕시코주 앨버커키 샌디아)와 몬태나 주립 대학교(MSU, 미국 몬태나주 보즈먼)가 참여하는 이 연구팀은 미국 에너지부(DOE)의 자금 지원을 받아 풍력 산업 응용 분야에 최적화된 비용 효율적인 탄소섬유 개발에 주력해 왔다.
- 프로젝트가 진행됨에 따라 연구팀은 현재의 연구 결과를 풍력 시장 및 그 외 분야에서 상용 제품 및 응용 분야로 확대하기 위해 산업계와의 파트너십을 모색하고 있다.
- 샌디아 연구소의 공기역학 기술 및 에너지 시스템 부서의 재료 및 설계 책임자인 브랜든 에니스 박사는 “우리는 비용 효율적인 응용 분야, 특히 풍력 에너지 분야에 최적화된 탄소섬유를 생산할 수 있다는 가설을 세우고 연구를 시작했다.”라고 설명한다. “많은 풍력 터빈 모델에서 탄소섬유를 사용하는 데에는 비용이 너무 많이 들 수 있지만, 그럼에도 불구하고 풍력 터빈 블레이드는 상업용 탄소섬유가 가장 많이 사용되는 분야이다.”
- ORNL 연구진은 탄소섬유의 생산 비용과 궁극적으로 시장 가격을 낮춰 더 널리 보급할 수 있도록 하는 프로젝트에 10년 이상을 투자해 왔다. 이러한 프로젝트에는 저렴하고 쉽게 구할 수 있는 섬유 등급의 폴리아크릴로니트릴(PAN) 전구체를 사용한 탄소섬유 평가뿐만 아니라, 4M Carbon Fiber(미국 테네시주 녹스빌)와의 협력을 통해 첨단 플라즈마 산화(APO, advanced plasma oxidation)를 포함한 탄소

섬유 전환 공정 최적화 연구가 포함된다.

- "이러한 연구를 통해 우리는 현재 시판되는 섬유에 비해 약 50% 더 저렴하게 섬유를 생산할 수 있다는 것을 발견했다."라고 에니스 교수는 말한다. 이는 더 저렴한 전구체와 생산량 증가가 결합되어 생산 비용이 절감되었기 때문이다.

- 하지만 성능 면에서 "압축 강도가 표준보다 20~30% 낮았다"고 그는 말한다. 특히 풍력 터빈 블레이드 스파 캡의 목표 적용 분야에서 이는 문제가 되었다.

- ORNL의 저명한 연구 개발 직원인 밥 노리스는 풍력 터빈 블레이드에서 "탄소섬유는 구조용 스파 캡 요소로 사용되는데, 이는 항공기 날개의 I형강이나 스파처럼 양쪽 끝에 캡이 있고 한쪽은 인장, 다른 쪽은 압축을 받는 구조이다. 이러한 용도에서는 탄소섬유의 잠재력을 최대한 활용하기 위해 압축력을 인장력과 유사하게 만들어야 한다."라고 설명한다.



그림 5. ORNL 연구원들(사진 뒤쪽은 밥 노리스, 앞쪽은 푸에시웅)이 실험실 규모의 습식 방사 라인을 사용하여 탄소섬유 제조에 필요한 PAN 토우를 생산하고 있다. 출처 | ORNL

- 탄소섬유 설계 프로젝트는 ORNL과 파트너들이 이전에 수행했던 저비용 섬유 생산 연구를 활용하고 확장하는 것을 목표로 삼았으며, 특히 압축 강도 향상에 중점을 두었다.

- 이는 개별 탄소섬유 필라멘트의 모양과 크기를 최적화하는 문제로 귀결되었으며, 이 내용은 프로젝트의 최신 간행물인 "[비용 효율적인 압축 성능 설계를 위한 대체 탄소섬유 형상에 대한 초기 평가: 크기 효과 연구\(Composites Part B\)](#)"에서 자세히 논의되었다.

탄소섬유 단면 형상: 원형에서 다엽형까지

- "복합재 산업에 사용되는 상용 탄소섬유는 거의 예외 없이 단면이 원형이다."라고 에니스 교수는 설명한다. "원형은 단순한 모양이며, 인장 강도에 중점을 둔 산업계의 요구를 반영한다. 대칭성 덕분에 원형 섬유는 가공 일관성이 뛰어나고 표면 품질도 우수하여 인장 강도에 더 큰 영향을 미친다." 이는 탄소섬유 복합재료가 사용되는 많은 항공우주 분야에 필수적인 요소이다.

- 바로 이 부분에서 ORNL의 기존 섬유용 PAN 기반 탄소섬유 연구가 중요한 역할을 한다. 산업용 탄소섬유를 만드는 데 사용되는 방사 방식과는 다른 방식으로 제조되는 섬유는 일반적으로 비원형 단면을 가지고 있다. 섬유용 섬유를 연구하면서 연구진은 섬유 모양(이 경우 "콩팥 모양과 같은 형태"라고 에니스 교수는 설명한다)과 최종 제품의 압축 강도 사이의 상관관계를 발견하기 시작했다.

- "비원형 섬유가 압축 강도 면에서 더 우수할 수 있다는 가설을 세운 이유는 동일한 단면적을 가진 원형 섬유에 비해 비원형 섬유 자체가 굽힘 저항성이 더 높기 때문이다."라고 그는 말한다. "필라멘트에는 '단면 관성 모멘트'라는 기하학적 특성이 있는데, 이는 섬유가 미세 좌굴에 더 잘 저항하도록 만들어주며, 결과적으로 복합재료의 압축 파손을 방지한다. 비원형 모양은 미세 좌굴에 대한 저항성을 높여준다. "더 높은 단면 관성 모멘트는 파손 발생 시점을 지연시키고 복합재료 내 섬유 배열을 개선하여 결과적으로 더 높은 압축 강도를 나타낼 수 있다는 것이 우리의 가설이다."

- 섬유 전구체 섬유의 경우, 비대칭적인 콩팥 모양의 섬유 직경이 "일부 이점을 보였지만 최적화되지는 않았다. 또한, 비대칭적인 모양은 불확실성을 야기하여 결과적으로 복합재 특성의 변동성을 높이는 경향이 있다."라고 에니스 교수는 덧붙였다.

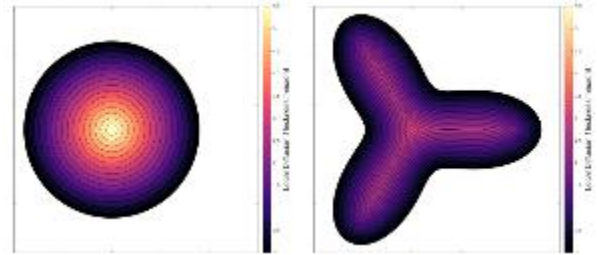


그림 6. 단면적이 40마이크론²로 동일한 원형 섬유와 3엽 섬유의 국부 확산 두께 비교. 출처 | 샌디아 국립 연구소

- 다음으로, 연구진은 필라멘트 단면에서 볼 수 있는 다양한 모양의 "엽" 개수가 다른 섬유들의 성능을 평가하기 위한 분석 연구를 수행했다. 그 결과, 특히 높은 섬유 부피 분율이 요구되는 응용 분야에서 비용과 압축 강도 측면에서 3개 및 6개의 엽을 가진 섬유가 가장 유망한 것으로 나타났다.
- 이러한 연구 결과를 바탕으로 연구진은 최근 두 가지 측면을 동시에 살펴보았다. 하나는 필라멘트 크기가 압축 강도에 미치는 영향이고, 다른 하나는 3개 또는 6개의 엽으로 이루어진 섬유를 제조하는 최적의 공정이다.
- 샌디아 연구소는 모델링 작업을, 오크리지 국립연구소(ORNL)는 제조 시험을, 미시간 주립대학교(MSU)는 재료 테스트를 담당했으며, 궁극적인 목표는 원하는 엽상 형태의 섬유를 일관되게 생산하는 것이었다. 에니스 교수는 "모델링 연구를 바탕으로 방사구 다이에 원하는 탄소섬유 모양을 만들 수 있도록 구멍을 설계하는 것부터 시작한다. ORNL은 제조 시험을 반복하여 형상과 기계적 성능을 제어했다. 3엽상 섬유 시험 연구에서는 섬유 부피 분율이 최대 69%에 달하는 복합재를 생산했는데, 이는 우리가 테스트한 어떤 원형 섬유보다도 높은 수치이다. 매우 유망한 결과이다."라고 말했다.

결과: 생산량 증가, 생산 비용 절감, 압축 강도 향상

- 이 프로젝트의 제조 시험, 재료 테스트, 시뮬레이션 및 비용 모델링을 통해 연구진은 현재까지 유효 직경이 최대 11마이크론에 달하는 3엽형 섬유를 개발하는 데 주력해 왔다(대부분의 섬유는 5~8마이크론 범위). 에니스 연구원은 비원형 형상을 측정하는 데 사용되는 유효 직경은 섬유 단면적에 대한 등가 직경으로 계산된다

고 설명한다.

- **성능 측면.** "ORNL에서 진행된 제조 시험 결과, 세 개의 엽으로 이루어진 형태가 가장 견고한 구조를 제공하며, 이를 통해 주입된 샘플에서 섬유 부피 분율을 70% 가까이 달성할 수 있었다. 압축 강도와 섬유 크기 사이의 상관관계가 크기가 커짐에 따라 유지된다면, 현재 개발 중인 구조에서 압축 강도가 더욱 크게 증가할 것으로 예상된다. 이러한 구조는 섬유 면적이 원형 섬유의 2.5배이고 굽힘 저항은 약 9배 더 높다."라고 에니스 교수는 말한다.
- **생산 속도 향상.** 원하는 섬유 성능을 달성하는 것 외에도, 3엽형 섬유는 일반적인 원형 단면 섬유에 비해 탄소섬유 생산 라인의 처리량을 2~3배 증가시키는 것으로 추정된다.
- "전구체를 탄소섬유로 변환하는 과정에서 속도를 조절하는 단계는 산화이며, 이는 확산 두께라고 불리는 섬유 치수의 특정 지표에 의해 제어된다."라고 에니스는 설명한다. "원형 섬유의 경우 확산 두께는 단순히 반지름이다. 비원형 섬유의 경우 대칭면까지의 거리이다. 세 개의 엽으로 이루어진 섬유의 경우 대칭면이 각 엽을 이등분하므로 동일한 단면적에서 확산 두께를 크게 줄일 수 있어 생산 라인 속도와 처리량을 높일 수 있다."
- 그는 덧붙여 "섬유가 변환 라인을 통과하는 방식은 확산 두께에 의해 제한되지만, 흥미로운 점은 원형 섬유가 단위 면적당 확산 두께가 기하학적으로 가장 높다는 것이다. 만약 이러한 제약 조건을 최적화한다면 원형 섬유를 선택할 리가 없다. 그 한 가지 기준에 있어서는 최악의 기하학적 형태이다."라고 말했다.
- 섬유의 크기/면적이 증가함에 따라 확산 두께는 원형 섬유의 확산 두께와 같아진다. "이 경우 라인 속도는 거의 동일하지만 섬유 면적이 더 크기 때문에 변환 라인의 생산 처리량을 두 배로 늘릴 수 있다."
- **생산 비용 절감.** 에니스에 따르면, "기본 상용 탄소섬유와 비교했을 때, 이 프로젝트 방식은 토우 수에 따라 생산 비용을 최대 50%까지 절감할 수 있다." 또한, 생산량 증가로 에너지 소비가 줄어들어 비용이 절감되는데, "전환 단계에서 에너지 비용이 40~50% 정도 절감된다."



그림 7. ORNL에서 습식 방사 방식으로 3엽형 PAN 필라멘트를 생산하기 위해 맞춤 설계한 방사구. 출처 | ORNL

다음 단계: 지속적인 임상 시험 및 산업 파트너십을 통한 규모 확대

- 탄소섬유 설계 프로젝트의 다음 단계는 무엇일까? 현재 샌디아 연구소는 수치 모

델링 연구를 지속하고 있으며, 횡방향 성능과 같은 다른 기계적 특성을 살펴보는 데에도 노력을 기울이고 있다. 한편, 오크리지 국립연구소(ORNL)는 습식 방사 공정을 최적화하고 규모를 확대하고 있는데, 이를 위해 해당 기술에 관심 있는 탄소섬유 제조업체들과 협력하고 향후 시험에서 회사별 맞춤형 PAN 화학 조성을 평가할 계획이다.

- "과거에는 탄소섬유 업계에서 섬유 또는 생산 특성 변화에 대해 주저하는 모습을 보였지만, 최근에는 관심이 증가하고 있으며 이러한 추세가 지속되기를 기대하고 있다."라고 에니스씨는 말한다. 현재 프로젝트 자문 위원회에는 탄소섬유 제조업체 뿐만 아니라 풍력 터빈 블레이드 제조업체 및 기타 관련 업체들이 참여하고 있다.
- ORNL은 더 큰 시험 샘플을 제공하기 위해 이러한 특수 탄소섬유의 생산량을 늘리고 자동화하는 작업을 진행하는 한편, 성능 향상을 더욱 평가하기 위해 더 큰 섬유 크기를 생산할 수 있는 새로운 금형 및 장비에도 투자하고 있다.
- 에니스 교수는 "목표는 분명히 상용화"라고 강조한다. 별도의 DOE I-Corps 프로그램은 공식적인 상용화 전략 개발을 목표로 한다. ORNL의 노리스 교수는 이러한 노력의 일환으로 다른 응용 분야를 제시하여 이 접근 방식에 대한 시장 수요를 촉진하고자 한다고 덧붙였다. 잠재적인 응용 분야로는 자동차 판스프링 또는 범퍼 구조, 압출 성형된 기판 시설용 I형 빔, 해양 석유 및 가스 시추용 드릴 라이저 및 인장 다리, 항공기 내부 바닥 또는 저장 구조물 등이 있다.

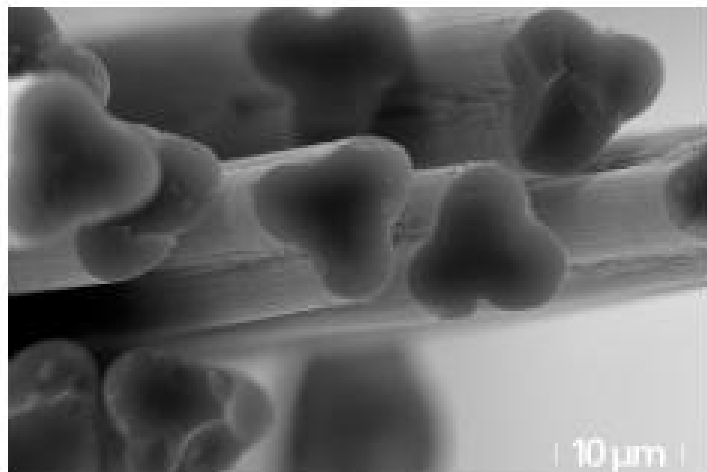


그림 8. 국립 연구소와 대학 연구진이 주도하는 탄소섬유 설계 프로젝트는 풍력 발전 및 기타 분야에 적용 가능한 압축 성능을 갖춘, 산업 현장에 바로 사용 가능한 저비용 탄소섬유 개발을 목표로 하고 있다. 이 현미경 사진은 프로젝트에서 개발한, 성능과 비용 목표를 최적화한 세 개의 로브 직경(일반적인 원형과는 다름)을 가진 탄소섬유 필라멘트를 보여준다. 출처 | 오크리지 국립 연구소(ORNL)

□ 유럽 ROMAIN 프로젝트, 풍력 터빈 블레이드의 로봇 기반 프리프레그 패치 수리 기술 검증(26.05.20.)

※ [Composites World] 개발된 프리프레그 기반 패칭 시스템은 수동 수리 기술에 비해 적층 및 경화 시간을 약 50% 단축했으며, 스페인의 가동 중인 터빈에서 현장 검증을 완료했다. / News

- <https://www.compositesworld.com/news/romain-project-validates-robotic-prepreg-patch-repair-for-wind-turbine-blades>
 - <https://projectromain.org/>
 - #유럽 #풍력/에너지 #자동화 #유리섬유 #복합소재 #프로젝트
 - 저자 : 그레이스 스테빈스, CompositesWorld 및 Products Finishing 수석 편집장
-
- 유럽 ROMAIN 프로젝트(EDP Renewables, 포르투갈 리스본)의 일환으로 복합재 풍력 터빈 블레이드의 구조적 수리를 자동화하도록 설계된 로봇 시스템이 개발 및 현장 검증을 거쳤다.
 - Tecnalía(스페인 산세바스티안)에서 개발한 이 시스템은 경량 로봇 어플리케이션을 사용하여 미리 제작된 프리프레그 패치를 블레이드 곡면에 밀착시키고 진공 압축 및 제어된 현장 열 경화를 수행함으로써 기존 수동 수리의 가장 위험하고 노동 집약적인 단계를 상당 부분 대체한다.
 - 현재 풍력 터빈 블레이드 유지보수는 전체 풍력 터빈 유지보수 비용의 15~25%를 차지하며, 대부분의 구조 수리는 여전히 숙련된 기술자가 고소에서 습식 적층 기법을 사용하여 수작업으로 진행하고 있다. 이러한 작업은 날씨의 영향을 많이 받고, 고도의 전문 인력이 필요하며, 수리 품질의 편차가 큼니다. 전 세계 풍력 터빈 설비가 확장되고 노후화됨에 따라, 그리고 블레이드가 해상으로 이동하고 크기가 커짐에 따라 이러한 문제는 더욱 심화될 것으로 예상된다.
 - ROMAIN 패칭 솔루션은 외피 라미네이트의 손상, 특히 샌드위치 코어 또는 주요 하중 지지 구조에 영향을 미치지 않는 표면 균열 및 박리를 대상으로 한다. 이러한 손상 유형은 가동 중 수리 활동의 상당 부분을 차지한다. 블레이드에 직접 수지를 도포하는 대신, 기술자는 제어된 조건 하에서 지면에 평평하고 경화되지 않은 패치를 준비한다. 이 패치는 유리 섬유/에폭시 프리프레그에 동시 경화 필름 접착제가 통합된 형태로 구성된다. 준비된 패치는 어플리케이션에 장착되고, 협업 로봇 팔의 손목을 통해 Aeronos(라트비아 리가)에서 개발한 로봇 배치 플랫폼에 장착되어 풍력 터빈 블레이드 표면의 필요한 위치에 배치된다.
 - 이 통합 시스템은 스페인 알바세테에 위치한 라 카바냐 풍력 발전소의 실제 운영 조건에서 검증되었다.

- 개발 과정에서 두 가지 프리프레그 시스템을 평가했다. 하나는 열 경화형 프리프레그와 동시 경화형 필름 접착제를 결합한 시스템이고, 다른 하나는 UV 경화형 프리프레그 시스템이다. 두 시스템 모두 인장 및 굴곡 시험에서 기준 블레이드 라미네이트보다 우수한 기계적 성능을 보였지만, 접착 성능은 현저히 달랐다. 열 경화형 필름 접착제는 기존 구조용 블레이드 접착제와 유사한 겹침 전단 강도를 나타냈으며, 가속 노화 시험 후에도 성능을 유지했다. 반면 UV 경화형 접착 시스템은 열 경화형 시스템의 절반 수준에 불과한 겹침 전단 강도를 보여 구조용이 아닌 용도로만 사용이 제한적이었다. 따라서 60°C에서 16시간, 120°C에서 30분까지 다양한 경화 시간을 제공하는 열 경화형 프리프레그 시스템이 최종적으로 선택되었다.
- 이 기술기의 핵심은 이중막 시스템이다. 아래쪽 막은 패치와 직접 접촉하고, 위쪽 막은 유연한 발열체와 진공 분배 네트워크를 감싸고 있다. 진공이 가해지면 두 막과 지지 프레임이 블레이드 표면에 밀착되어 패치 전체 면적에 걸쳐 균일한 압력과 접촉을 보장한다. 발열체는 Tecnalia가 특허를 획득한 유리섬유에 인쇄된 저항성 탄소 기반 잉크를 사용하여 100°C의 목표 경화 온도에서 $\pm 4^\circ\text{C}$ 의 균일한 열 분포를 구현한다. 내장된 고온계와 진공 센서를 통해 실시간으로 공정을 모니터링할 수 있으며, 제어 소프트웨어는 각 기술 주기가 완료될 때마다 기술 인증서를 생성한다.
- 현재 구성에서 이 도포기의 무게는 약 1.5kg이며 최대 210 × 210mm 크기의 패치를 사용할 수 있다. 1m 이상의 블레이드 곡률 반경에도 적용 가능하며, 모듈식 설계로 다른 패치 크기로 확장할 수 있다. 크기가 다양한 도포기 3~4개 세트로 대부분의 일반적인 외피 수리 요구 사항을 충족할 수 있을 것으로 예상된다.
- Tecnalia의 산세바스티안 복합재 연구소에서 폐기된 블레이드를 이용한 실험실 개발 시험을 거친 후, 통합 시스템은 스페인 알바세테의 라 카바냐 풍력 발전소에서 실제 운영 조건 하에 검증되었다. 로봇 패칭 시스템을 사용하여 두 건의 구조 블레이드 수리가 완료되었다. 시험 결과 안정적인 작동, 신뢰할 수 있는 온도 및 진공 제어, 그리고 일관된 수리 결과가 입증되었다. 적층 및 경화 단계의 수리 시간은 자동화 시스템을 사용했을 때 약 170분으로, 수동 적층 방식의 320분에 비해 약 50% 단축되었다.
- 현재 진행 중인 작업에는 수리된 적층재의 피로 시험, 해양 환경에서의 장기간 환경 노출 시험, 그리고 수리 주기 시간의 추가 최적화가 포함된다.



그림 9. EDP의 라 카바냐 풍력 발전소에서 진행된 수리 검증 시험 중, Tecnia 패치 적용기가 통합된 에어로네스 로봇 배치 시스템의 전경. 출처 | ROMAIN 프로젝트

□ 독일 Neuenhauser Maschinenfabrik, Luvocom 3F의 3D 프린팅 소재 공식 가공업체로 선정(26.05.20.)

※ [Composites World] Neuenhauser Maschinenfabrik이 Luvocom 3F 3D 프린팅 소재의 공식 가공업체로 선정되었다. / News

• <https://www.compositesworld.com/news/neuenhauser-maschinenfabrik-becomes-official-processor-of-luvocom-3f-3d-printing-materials>

• #독일 #적층제조 #탄소섬유 #복합소재 #3D 프린팅

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

- Neuenhauser Maschinenfabrik(독일 노이엔하우스)은 적층 제조(AM) 분야에서 사업을 확장하여 Lehvoss Group(독일 함부르크)의 Luvocom3F 포커스 소재 공식 가공업체로 선정되었다. 이를 통해 Neuenhauser Maschinenfabrik은 산업용 3D 프린팅 분야의 전문성을 더욱 강화하고, 검증된 고성능 필라멘트를 기반으로 자체 개발한 애플리케이션과 서비스를 외부 고객에게 제공할 수 있게 되었다.
- Neuenhauser Maschinenfabrik은 수년간 기능성 및 양산 부품 생산을 위한 산업 맞춤형 3D 프린팅 인프라를 운영해 왔다. Luvocom3F 핵심 소재는 이러한 목적을 위해 현대화된 Neuenhauser Maschinenfabrik의 프린팅 시설에서 검증을 완료했다. 핵심 소재는 산업용 FFF(Fused Filament Fabrication) 프린팅 분야에서 명확한 소재 전략을 제시한다. 대부분의 기술 응용 분야에 적합한 세 가지 소재로, 재현 가능한 품질, 공정 안정성 및 양산 능력을 고려하여 설계되었다.
- 구체적으로, Luvocom 3F 초점 조절 재료는 다음과 같다.
 - 높은 인성, 우수한 표면 품질 및 뒤틀림 없는 인쇄 특성을 지닌 비강화 폴리아미드이다.
 - 고강도, 내열성 및 낮은 수분 흡수율을 지닌 탄소섬유 강화 PET 소재이다.
 - 탄소섬유 강화 PPS는 높은 강성과 강도, 내화학성 및 난연성(UL 94 V0)을 갖춘 금속 대체재이다.
- Neuenhauser Maschinenfabrik GmbH의 적층 제조 부문 책임자인 마티스 클라이너트는 "우리의 목표는 기계 공학 분야에서 적층 제조(AM)를 신뢰할 수 있는 생산 도구로 자리매김하는 것이다."라고 말하며, "Luvocom3F 포커스 소재는 산업적으로 중요한 특성과 안정적이고 재현 가능한 인쇄성을 매우 훌륭하게 결합한 제품이다."라고 덧붙였다.
- Lehvoss(독일 함부르크)의 관점에서 이번 협력은 당연한 수순이다. 몇 가지 명확하게 정의된 소재에 집중함으로써 사용자는 적층 제조(AM)를 경제적으로 확장하고 공정 신뢰성을 확보하여 기존 생산 환경에 통합할 수 있다. Lehvoss 그룹의 제

품 관리자인 마르쿠스 레히베르거 박사는 “Neuenhauser Maschinenfabrik는 이제 점점 더 확대되는 가공업체 및 사용자 네트워크의 일원이 되었다.”라고 말하며, “우리는 협력적인 접근 방식을 통해 노하우를 점진적으로 확장해 나가고 있으며, 항상 산업용 3D 프린팅을 더욱 쉽고 빠르며 비용 효율적으로 만드는 것을 목표로 하고 있다.”라고 덧붙였다.

- Neuenhauser Maschinenfabrik는 공식 프로세서 승인을 통해 잠재적 분석 및 부품 개발부터 외부 고객을 위한 양산에 이르기까지 까다로운 3D 프린팅 애플리케이션을 위한 역량 있는 산업 파트너로서 자리매김했다.



그림 10. Neuenhauser Maschinenfabrik의 프린트 팜. Luvocom3F 프린터로 출력한 기계 부품들. 출처 | Lehjvoss

□ 독일 RWTH 아헨공대 ITA 연구소, 압력 용기 돔 보강에 필라멘트 와인딩 기술 사용(26.05.20.)

※ [Composites World] ITA의 연구원들은 추가적인 기계, 공구 교체 또는 섬유 절단 작업 없이 복합재 압력 용기에 국부적인 돔 보강을 제공하기 위해 점착성 토우프레그를 사용하는 하이브리드 권선층을 연구하고 있다. / News

- <https://www.compositesworld.com/news/rwth-aachen-university-uses-filament-winding-alone-for-pressure-vessel-dome-reinforcement>

- #독일 #필라멘트와인딩 #탄소섬유 #복합소재 #시장

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

○ 수소 저장용 복합재 압력 용기(CPV)는 연료 전지 시스템에서 매우 중요하지만 비용이 많이 드는 부품이다. 복합재 외피는 작동 압력에 따라 전체 용기 비용의 약 57~67%를 차지한다. 따라서 돔 영역에 특정 부위 보강을 제공하여 이러한 재료 부담을 줄이는 것이 CPV 개발의 핵심 과제가 되었다. 독일 아헨에 위치한 RWTH 아헨 대학교 섬유공학연구소(ITA)에서는 필라멘트 와인딩 기술만으로 돔 영역에 특정 부위 보강을 제공할 수 있는지 연구하고 있다. 이를 통해 기존에 돔 영역 보강 전략을 복잡하게 만들었던 추가 제조 공정을 없앨 수 있을 것으로 기대된다.

○ 설계상의 어려움은 원통형 압력 용기에 내재된 하중 분포에서 비롯된다(그림11. 원주 방향 응력은 축 방향 응력의 두 배에 달하며, 돔 영역은 표준 극성 또는 나선형 권선 방식으로는 제공할 수 없는 특별한 보강이 필요하다. 2013년 미국 에너지부(DOE) 설계 보고서에서는 권선 전에 돔에 배치하는 개별 탄소섬유 스트립인 "도일리(doilies)"를 이러한 국부적 보강을 제공하는 한 가지 방법으로 제시했지만, 2015년 후속 보고서에서는 공정 복잡성과 대량 생산 가능성에 미치는 영향에 대한 우려로 인해 이 혁신 기술을 기본 설계에서 제외했다.

○ 그 이후로 이 문제를 재검토하기 위한 두 가지 주목할 만한 산업적 접근 방식이 등장했다. Cevotec GmbH(독일 운터하칭)는 권선 전에 라이너 돔에 얇고 방향성이 있는 섬유 패치를

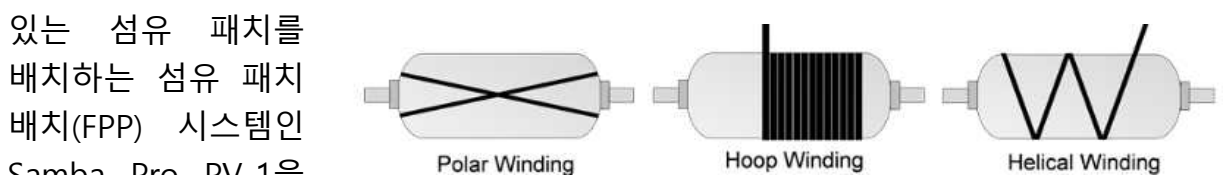


그림 11. 필라멘트 와인딩 압력 용기 제조에 사용되는 권선 유형.

배치하는 섬유 패치 배치(FPP) 시스템인 Samba Pro PV-1을 개발했다. 네덜란드 로테르담에 위치한 Taniq BV는 자동 섬유 배치, 필라멘트 권선 및 자동 고무 권선을 단일 로봇 셀 내에 통합하여 라미네이트 적층 순서의 어느 지점에서든 국부적인 돔 보강을 적용할 수 있도록 했다. 그러나 두 접근 방식 모두 기계 간 부품 이송 작업, 추가 공구 교체 또는 전용 섬유 절단 및 배치 단계를 도입한다.

- ITA의 연구는 기존과는 다른 접근 방식을 취한다. 필라멘트 와인딩 공정 중 토우프 레그의 고유한 점착성을 활용하여 "하이브리드 레이어"를 감는 것이다. 기존의 폴라, 헬리컬, 후프 레이어는 각각 돔 또는 실린더 영역 중 한쪽 끝에만 위치하는 반면, 하이브리드 레이어는 한쪽 끝은 돔에, 다른 한쪽 끝은 실린더에 위치한다. 토우프 레그는 섬유와 부분 경화된 수지를 하나의 중간 제품으로 결합하기 때문에, 점착성이 있는 수지가 와인딩 과정에서 마찰력을 제공하여 표준 습식 와인딩 공정으로는 안정적이지 않은 비측지 궤적을 가능하게 한다. 그 결과, 기계 변경, 툴링 변경, 섬유 절단 및 재공급 작업 없이 라미네이트 적층 구조 내 어느 위치에도 통합할 수 있는 국부적인 보강층을 얻을 수 있다.
- ITA의 튜브형 복합재 시설에서 실험실 규모로 타당성이 입증되었지만, 엔지니어링 상의 과제가 남아 있다. 가장 중요한 과제는 실린더 끝부분의 재료 축적이다. 여러 개의 하이브리드 층을 감을 경우, 과도한 국부적 두께 축적과 구조적 안정성 문제를 방지하기 위해 끝부분의 위치를 조정해야 할 가능성이 높다. 권선 장력, 토우 대역폭 및 용기 직경에 민감한 매개변수인 실린더 끝부분과 돔 전환부 사이의 거리 또한 최적화가 필요하다. 이 거리를 최소화하면 재료를 절약할 수 있지만 섬유 불안정성 및 미끄러짐 위험이 증가한다.
- 다음 단계는 Rheinmetall Invent GmbH(RHWind, 독일 네카르줄름)의 권선 프로그램을 사용하여 생성된 적층 형상을 활용한 유한 요소 모델링에 중점을 둘 것이다. Rheinmetall과 공동으로 진행한 공공 자금 지원 프로젝트인 H2Lorica 에서 ITA는 하이브리드 레이어를 제작하고 제조 가능한 적층 형상을 유한 요소 소프트웨어로 내보내 고정밀 손상 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 소프트웨어 기능을 확장했다. 목표는 하이브리드 레이어가 특정 나선형 레이어를 교체할 만큼 충분한 국부적 보강 효과를 제공할 수 있는지 여부를 판단하고, 만약 그렇다면 그 결과를 바탕으로 실린더 끝점 위치 및 가공 조건을 최적화하는 추가 제조 시험을 진행하는 것이다.

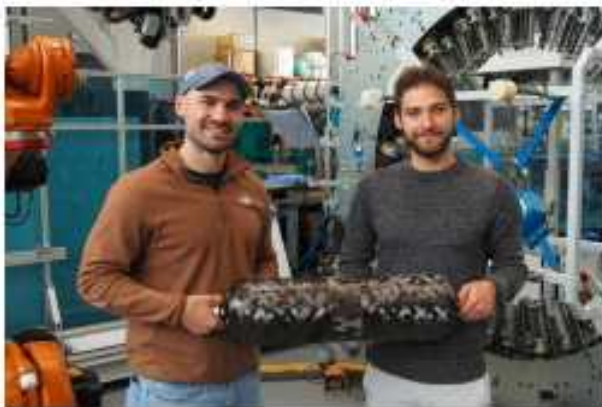


그림 12. ITA의 튜브형 복합재료 연구실에서 제작한 시제품을 들고 있는 연구원 마커스 웰시(왼쪽)와 야네스 뒤르(오른쪽). 출처 | RWTH 아헨 대학교 ITA



그림 13. 필라멘트 와인딩 돔 보강층의 제조 과정 시연. 출처 | RWTH 아헨 대학교 ITA

□ 스위스 Empa, 더 저렴하게 친환경 수소 생산('26.05.20.)

※ [Chemie] 전기분해용 신소재 /News

- <https://www.chemie.de/news/1188726/gruenen-wasserstoff-guenstiger-herstellen.html>
- <https://www.chemie.de/news/1185561/starkes-umsatz-und-ebit-wachstum-von-thyssenkrupp-nucera-im-ersten-quartal-des-neuen-geschaeftsjahres.html>
- #스위스 #녹색 수소 #재료과학 #전해조

- 재생에너지를 이용해 물에서 생산하는 친환경 수소는 중요한 지속 가능한 연료이자 에너지 저장 매체이다. 하지만 산업적으로 생산하는 비용이 화석 연료를 이용한 기존 수소 생산 방식보다 훨씬 비싸다. Empa(스위스 뒤벤도르프)연구진과 파트너들은 더욱 효율적이고 저렴할 뿐만 아니라 산업 규모로 확장 가능한 물 전기분해 용 소재를 개발하고 있다.
- 수소는 화석 연료를 대체할 수 있는 에너지 자원으로서 에너지 전환의 핵심 축이다. 원리는 간단하다. 재생 가능한 에너지원에서 얻은 전기와 물을 반응시켜 수소와 산소를 생성한다. 생성된 수소를 연소시키면 대기 중 산소와 반응하여 다시 물이 생성되고, 이 순환 과정이 완료된다. 이 모든 과정에서 온실가스가 배출되지 않는다.
- 적어도 이상적인 시나리오는 그렇다. 하지만 현실에서는 전기분해를 통한 "친환경" 수소 생산은 치열한 경쟁에 직면해 있다. 현재 수소의 90% 이상은 화석 연료, 주로 천연가스에서 생산된다. 가장 큰 이유는 전기분해를 통해 생산되는 보다 지속 가능한 수소의 생산 비용이 화석 연료를 사용하는 경우보다 약 두 배나 비싸기 때문이다.
- 스위스 국립과학재단(SNSF)과 프랑스 국립연구기관(ANR)의 지원을 받는 프로젝트에서, Empa의 "에너지 변환 재료" 연구실 연구원들은 이 문제를 해결하고자 한다. 전기분해 공정에서 주요 비용 요인 중 하나는 전해조 제작에 사용되는 재료이다. Empa 연구원들은 부식 연구소(Institut de la Corrosion, 프랑스 브레스트)와 LEMTA(프랑스 낭시) 연구원들과 함께 전기분해 장비의 두 가지 핵심 부품에 대한 보다 비용 효율적인 대안을 연구하고 있다.

부식에 대해서는 걱정하지 마세요.

- 연구진은 소위 "고분자 전해질 막 수전해(PEMWE)" 기술에 집중하고 있다. PEMWE 전해조는 효율적이며 재생 에너지에서 예상되는 에너지 변동에 잘 대응한다. 그러나 전해조 내부 환경은 부식성이 매우 강하다. Empa 연구원인 콘스탄틴 예고로프는 전해조 중앙 챔버에서 강철이 "차에 설탕을 넣듯" 쉽게 녹는다고 설명한다. 고

산성 환경에 직접 접촉하지 않는 부품조차도 부식된다. 또한 전해조로 유입되는 초순수에 아주 미량의 금속이 녹아 있어도 성능과 수명이 저하된다.

- 따라서 전해조 내부의 물 공급 및 생성 가스 배출 부품은 티타늄으로 만들어지는데, 티타늄은 가격이 비싸고 가공하기 어렵다. 하지만 그것만으로는 충분하지 않다. 티타늄이 산화되어 전해조의 효율을 저하시키는 것을 방지하기 위해 부품에 귀금속인 백금을 코팅해야 하므로 비용이 더욱 증가한다.
- 재료 과학자인 에고로프는 부식 저항성을 손상시키지 않으면서 값비싼 백금을 대체할 방법을 찾고 있다. 그는 소위 고결정성 산소 결핍 루틸이라는 특수한 형태의 산화티타늄에 주목하고 있다. 이 산화물은 특정 위치에 산소 원자가 부족하여 우수한 전도성을 가지며, 높은 결정성은 뛰어난 내식성을 보장한다. 이는 PEMWE 전기분해에 필요한 바로 그 조건이다. 연구팀은 티타늄 기판을 강철로 대체하고 있다. 에고로프는 "강철은 가격이 저렴할 뿐만 아니라 가공하기도 훨씬 쉽다. 덕분에 셀의 효율을 높이는 새롭고 진보된 부품 설계가 가능해집니다."라고 설명한다. 견고한 코팅 덕분에 부식성 환경에서도 재료가 손상될 염려는 없다.

산업 현장에서의 적용 가능성 또한 처음부터 고려되었다.

- 초기 결과는 혁신적인 코팅의 높은 내식성을 확인시켜 준다. "우리는 PEMWE 전해조의 첫 번째 구성 요소인 소위 바이폴라 플레이트에 산화티타늄을 성공적으로 코팅하는 방법을 개발했다."라고 에고로프는 말한다. Empa 연구소의 과학자가 사용한 방법은 물리적 증착(PVD)이라고 하며 산업계에서 널리 사용된다. "산업계에서 실제로 사용할 수 있는 것을 개발하는 것이 우리에게 중요하다."라고 연구원은 강조한다.
- 에고로프가 Empa에서 생산하는 부품들은 그의 협력사들에 의해 엄격한 부식 테스트를 거치는데, 먼저 실험실 조건에서 테스트를 진행한 후 실제 작동 중인 전해조에서 테스트를 진행한다. 양극판은 이미 이 테스트를 성공적으로 통과했다. 다음으로 연구진은 또 다른 핵심 부품에 산화티타늄, 즉 다공성 수송층을 코팅할 계획이다.
- "다공성 소재에 코팅하는 것은 많은 어려움을 수반한다."라고 에고로프는 설명한다. 기공이 고르게 코팅되어야 기공 내부의 부식을 방지할 수 있지만, 동시에 기공이 막히지 않아야 한다. 하지만 이 코팅 전문가는 이러한 목표를 달성할 수 있다고 확신한다. 이 프로젝트는 2026년까지 진행될 예정이다. 이후 Empa 연구진은 산업 파트너를 물색하여 이 혁신적인 기술을 상용화 단계로 발전시키고자 한다.

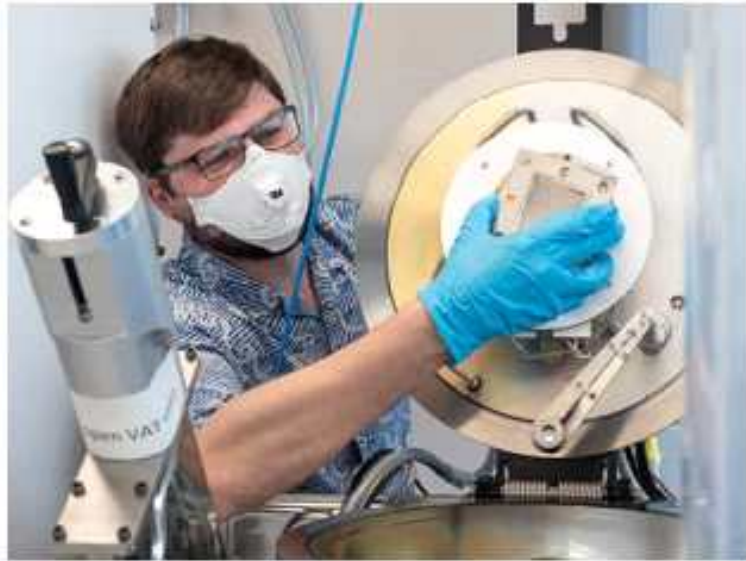


그림 14. Empa 연구원 콘스탄틴 예고로프는 부식 방지 티타늄 산화물로 스테인리스강 부품을 코팅하여 친환경 수소 생산을 더욱 경제적으로 만들고 있다. 출처 | Empa

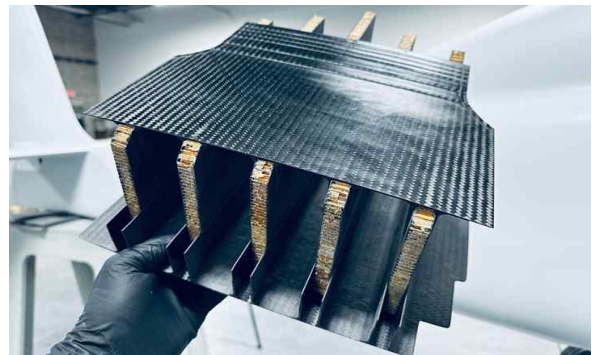
□ 미국 DarkAero, 파이 조인트를 사용하여 복합재 날개의 비행 가능 영역을 확장하는 방법(26.05.22.)

※ [Composites World] DarkAero는 자사의 복합재 프로토타입 항공기인 DarkAero1의 고속 돌풍 하중 조건에서의 비행 시험 범위를 넓히기 위해 중앙 날개 박스 조립체의 맞대기 이음매를 교체했다. / News

- <https://www.compositesworld.com/articles/using-pi-joints-to-expand-a-composite-wings-flight-envelope>
- <https://www.darkaero.com/>
- #미국 #항공우주 #수지 #에폭시 #탄소섬유 #복합소재
- 저자 : 라이언 스투베, DarkAero Inc. 수석 엔지니어

○ DarkAero1은 DarkAero(미국 위스콘신주 매디슨 소재) 에서 설계 및 제작한 고속 장거리 실험용 키트 항공기 시제품이다. 개발 과정에는 고속 비행 시험에 앞서 전체 복합재 기체의 구조적 건전성을 검증하기 위한 광범위한 하중 시험이 포함되었다.

○ 비행 시험 계획 및 지상 시험을 통해 중앙 날개 박스 맞대기 이음새와 플랩 제어 시스템 마운트의 강성을 비행 전에 수정해야 한다는 점이 확인되었고, 새로운 해결책이 필요했다.



○ DarkAero1의 중앙 날개 박스는 이제 파이 조인트를 사용하여 압축 하중을 받는 동안 중앙 날개 외피를 안정화한다. 이러한 구조적 개조는 초기 구상부터 전체 날개 조립체의 사내 정적 하중 시험에 이르기까지 엄격한 설계 제약 조건으로 가득 찬 엔지니어링 과제를 안겨주었다.

그림 15. 추가적인 안전 여유를 확보하기 위해, 날개 상반각이 조종석을 가로지르는 수평 개뼈 모양의 적층 구조로 바뀌는 부분인 날개 뒷면 아래에도 더 짧은 파이 조인트 세그먼트를 설치했다. 출처 | DarkAero Inc.

DarkAero는 누구인가?

○ 진저 가디너(GG): 모든 것은 차고에서 만들 수 있는 가장 빠르고 장거리 비행이 가능한 복합 소재 항공기를 만들겠다는 아이디어에서 시작되었다. 항공우주, 기계, 전기 공학 학위를 가진 세 형제로 구성된 창립자들은 주말 여행으로 중서부에서 동부 또는 서부 해안까지 비행하고 싶어 했다. 이것이 발전하여 시속 275마일(약 434km)의 순항 속도와 1,700마일(약 2,744km)의 비행 거리를 목표로 하는 2인승 나란히 앉는 좌석 배치의 프로토타입 항공기인 DarkAero1이 탄생했다.

○ 슈투베는 형제 중 한 명이 설계도에 따른 조립식 키트를 이용해 실험용 항공기를

제작하고 있었는데, 이는 원자재부터 시작하여 상당한 제작 지식과 수천 시간의 작업이 필요한 작업이었다고 설명한다.

- 반면, 공장에서 바로 부품들을 조립하여 완성하는 간편 조립 키트는 훨씬 매력적인 대안이다. 이러한 배경에서 DarkAero는 실험용 항공기 키트 회사로 시작하여, 개별 제작자들에게 복합재 항공기 부품과 조립품을 공급하는 것을 목표로 삼았다.



그림 16. 본격적인 지상 시험을 시작하기 전의 DarkAero1 시제기. 출처 | DarkAero

- 하지만 DarkAero1 개발을 통해 회사의 기술력과 역량, 그리고 팀 규모가 커졌다고 스투베는 말한다. "현재 우리는 항공우주 복합재 제조 및 금형 제작 과정을 가르치고 있다. 이를 통해 항공기, 선박, 자동차 등 다양한 프로젝트에서 학생들과 협력할 수 있게 되었다. 또한 설계 지원, 툴링 제작, 심지어 기체 전체를 제작하는 서비스도 제공하고 있다. 이러한 계약 사업을 통해 지속적인 성장을 이루어 왔으며, 우리 회사는 항상 열정적인 인재를 팀에 영입하고자 한다."

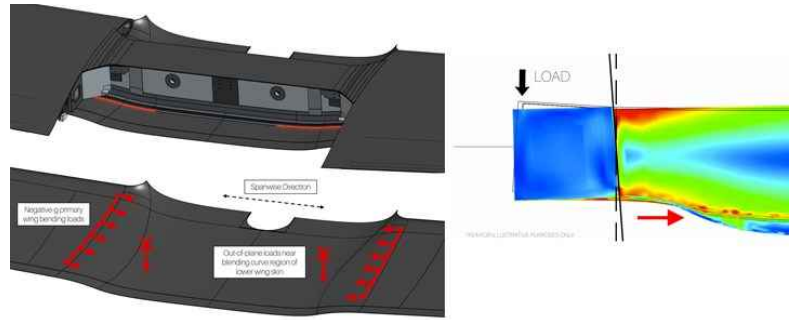
습식 날개 설계, 맞대기 이음 조립

- 라이언 스투베(RS): 실험용 항공기 관련 규정상 필수 사항은 아니지만, DarkAero의 자체 기준은 인증 항공기 프로그램에 더 가깝다. DarkAero1 개발 과정에서는 비행 시험에 앞서 전체 복합재 기체의 구조적 안정성을 확보하기 위해 광범위한 하중 시험을 진행해 왔다. 이와 동시에 비행 시험 계획과 비행 범위도 구체화되고 있다.
- GG: DarkAero1의 속도 및 항속거리 요건 때문에 날개 설계에 다소 새로운 접근 방식이 필요했다. 스투베는 "설계만큼이나 제조에도 중점을 두어 750파운드(약 340kg)의 공중량 목표를 세웠는데, 이는 비슷한 크기의 랑케어(Lancair) 항공기 무게의 절반 정도이다."라고 말한다. 또한, 이 항공기의 빠른 순항 속도는 기체 구조에 상당한 공기역학적 하중을 가한다.
- RS: 날개 길이가 23피트 5인치인 시제품 날개는 전체가 탄소섬유 강화 복합재로 접합되어 있으며 무게는 100파운드를 조금 넘는다. 기존의 응력 외피 설계는 외피 자체에 주로 의존하고, 그 다음으로 외피 좌굴을 방지하기 위해 속이 빈 격자형 내부 구조를 사용했다. 하지만 개별적으로 성형된 수많은 리브를 사용하는 대신(이는 제작에 많은 노동력이 필요하다), 우리는 4x8피트 크기의 판재를 CNC 가공하여 날개와 동체에 필요한 2D 형상으로 자체 제작한 벌집형 코어 패널을 사용한다. 그런 다음 정밀한 표면 처리, 에폭시 페이스트 접착제 및 자체 개발한 조립 공정을 사용하여 이 패널들을 접합하여 간단한 맞대기 이음매로 이루어진 격자 구조를 만듭니다.

DarkAero1 중앙 날개 단면 하중 및 형상

- 날개는 또한 날개 뿌리에서 끝까지 이어지는 77갤런 용량의 연료 탱크 역할을 한다. 하부 날개 스킨은 날개 끝에서 날개 끝까지 하나의 부품으로 이루어져 있으며, 상부 날개 스킨은 두 개의 분리된 부품으로 구성되어 있고, 동체/중앙 날개 박스 내에서 하중을 전달하는 도그본 형태의 중앙 부재가 있다.

- 하부 날개 스킨은 또한 조종석 바닥과 중앙 날개 박스 아래 동체 스킨을 형성한다. 즉, 하부 날개 스킨의 형상은 날개 뿌리 근처에서 에어포일 형상과 동체 형상 사이를 매끄럽게 연결한다.



- 허니콤 코어 패널을 스킨에 맞대어 접합한 속이 빈 격자 구조는 5개의 허니콤 전단 웹을 통해 중앙 날개 박스 부분까지 이어진다. 이러한 구조 덕분에 날개는 초기 양의 G 및 음의 G 정적 하중 시험을 통과했다.

그림 17. DarkAero1 중앙 날개 단면은 곡선 영역(빨간색 선)에서 에어포일 단면이 동체와 만나는 부분을 보여준다(왼쪽 위). 빨간색 화살표는 음의 G 하중 하에서 하부 날개 스킨에 작용하는 주요 평면 내 하중과 이에 상응하는 이차적인 평면 외 하중 조건을 나타낸다(왼쪽 아래). 이 이차적인 하중 조건은 날개 뿌리 부근의 곡선형 패널 형상이 편심 하중을 받기 때문에 발생하며, 이로 인해 중앙 전단 웹 접합부가 인장 상태에 놓이게 된다. 유한 요소 해석(FEA) 결과는 설명을 위한 것으로, 동일한 하중 하에서 조종석 쪽 날개 뿌리의 후방 모습을 보여준다(오른쪽). 빨간색 화살표는 하부 날개 스킨이 구조물의 나머지 부분과 분리되어 변형되는 지점을 나타낸다. 출처 | DarkAero

중앙 날개 박스 맞대기 이음새의 재설계가 필요하다.

- RS: 하지만 위에서 언급했듯이, 비행 시험 범위를 구체화하는 과정에서 수직 돌풍에 저항하기 위해 날개의 최대 양력 하중 강도를 높여야 한다는 점이 분명해졌다. 수직 돌풍은 양방향 모두에서 양력이 갑자기 증가할 확률이 동일하다. 시험 하중 값을 높이면 날개 중앙 부분이 주로 하부 날개 표면의 고유한 곡률 때문에 더 높은 2차 굽힘 응력을 받게 된다. 이러한 응력은 하부 날개 표면 적층판이 압축 상태인 음의 G 양력 조건에서 면외 하중을 유발한다. 날개와 동체 사이의 공기역학적으로 매끄러운 전환부는 항력을 줄이는 데 도움이 되지만, 국부적으로 곡선형 하중 경로를 가진 접착식 응력 표면 설계에서는 구조적으로 어려운 문제를 야기한다.
- GG: 이 하부 날개 외피 패널은 곡률을 가지고 있지만 본질적인 안정성은 없다. 스투베는 "기본적으로 지지대가 없는 패널이다."라고 말한다. "그래서 우리의 문제는 편심 하중을 받는 이 패널을 얼마나 지지해야 하는가였다. 패널이 곡면이기 때문에 분석하고 정의하기가 항상 어렵다. 재질 자체는 비행 중 발생하는 인장 및 압축 하중을 견딜 수 있지만, 편심 하중을 받으면 좌굴이 발생하기 쉽기 때문이다." 따라서 좌굴을 방지하기 위해서는 평면 외 하중에 대한 내부 구조적 저항력이 여

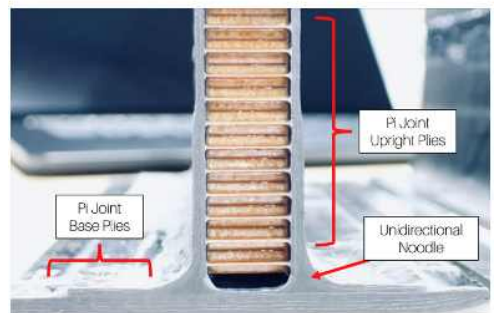
전히 필요했다.

- RS: 이전 정적 날개 하중 시험에서 관찰된 구조적 변형 모드를 통해, 고하중에서 날개의 첫 번째 파손 메커니즘은 동체 곡률과 날개 에어포일이 만나는 지점, 즉 중앙 전단 웹과 하부 날개 스킨 사이의 맞대기 접합부의 면외 인장 강도라는 것을 알게 되었다. 이 중앙 영역 바깥쪽에서는 상부 및 하부 날개 스킨이 거의 평행하여 본질적인 좌굴 경향이나 불안정성이 없다. 따라서 추가 하중 시험을 통과하기 위한 수정은 날개 중앙 영역과 하부 날개 스킨과 중앙 전단 웹 사이의 새로운 접합 방식에 집중되었다.

파이 조인트가 해결책이다

- GG: 스투베는 "맞대기 이음은 적절한 안전 여유가 있을 때 제조 공정이 더 간편하기 때문에 처음 선택되었다."라고 말한다. "하지만 그들은 단순한 맞대기 이음보다 더 강한 이음새가 있다는 것도 알고 있었다."
- RS: 파이 조인트는 면외 하중 조건을 이중 겹침 전단 조인트로 더욱 고르게 전달한다. 이는 조립용 페이스트 접착제가 박리 또는 인장 하중보다 전단 강도가 훨씬 강하기 때문에 이상적이다. 기존 구조 분석 결과를 유지하기 위해 벌집형 전단 웹 구조를 유지해야 하는 요구 사항을 고려할 때, 벌집 패널 치수에 맞춘 파이 조인트는 이 문제에 대한 유망한 해결책으로 나타났다.

- DarkAero1은 접합 형상을 구현하는 데 필요한 제조 공정이 매우 복잡하고 노동 집약적이었기 때문에 이전에는 기체 어디에도 파이 조인트(pi joint)를 사용하지 않았다. 이 항공기는 주로 진공 보조 수지 이송 성형(VARTM)과 전체 복합재 조립체의 무지지 후경화 방식을 사용한다. 최초 시제기 제작 당시 예산이 제한적이었기 때문에 복잡한 복합재 부품은 최소화되었고, 저비용 고품질 제조를 염두에 두고 설계되었다. 상온 보관 및 오토클레이브 외부 경화(OOA) 에폭시 프리프레그 기술의 발전으로 이제는 상대적으로 낮은 비용을 유지하면서도 더욱 복잡한 시제기 복합재 부품을 제작할 수 있게 되었다.



- DarkAero1 날개 에 파이 조인트를 적용하기 위한 첫 단계 중 하나는 전체 구조 보강의 기초를 다지는 간단한 타당성 조사를 수행하는 것이었다. 파이 조인트 제조 기술, 조인트 강도

그림 18. 만능 시험기에서 인장 시험을 하기 전, 맞대기 접합부 (위) 와 파이 접합부 (아래) 요소 시험편의 단면도이다. 벌집형 패널과 베이스 라미네이트는 기존 다크에어로 1 프로토타입 날개 구조에 사용된 재료를 재현한 것이다. 출처 | DarkAero

특성 분석, 세부 시험편 적층재 변경, 기존 날개 구조 분해, 새로운 구조 설치 및 경화 후 조립 등 모든 과정을 거쳐 파이 조인트 구조 보강을 본격적으로 추진했다. 대략적이지만 실현 가능한 방향을 설정한 후, 초기 구조 특성 분석 테스트는 만능 시험기에서 간단한 요소 수준의 조인트 인장 시험으로 시작되었다.

하중 시험용 제조 요소 적층 체

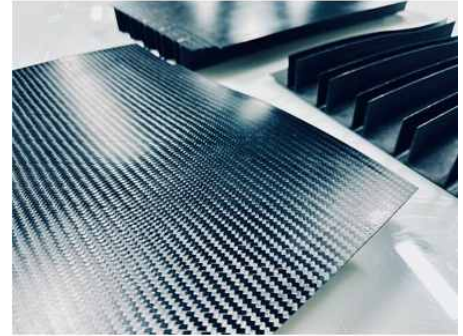
- GG: DarkAero는 이 특정 용도에 맞춰 파이 조인트를 제작한 적은 없지만, 다른 용도에 적합한 재료와 제조 기술을 사용한 경험이 있었다. 스투베는 "궁극적으로 우리는 파이 조인트를 제작할 수 있을 뿐만 아니라, 이번 재설계에 맞는 조립체를 만들어 테스트해야 했다."라고 말한다. "그래서 '만들고 부숴보는' 물리적 접근 방식을 택했다. 그런 다음, 기본적인 구성 요소 피라미드를 따라 시편 테스트 단계를 점차 높여갔다."
- RS: DarkAero는 유한 요소 해석(FEA) 및 컴퓨터 시뮬레이션 기능을 보유하고 있지만, 날개 재설계에는 여전히 실제 시험편을 제작하고 테스트해야 했기 때문에 제한된 물리적 테스트 프로그램에서 얻은 실제 데이터에 더 많이 의존하는 것이 효율적이었다. 예비 테스트 샘플은 DarkAero1 날개에 특화된 변수를 사용하여 제작되었다. 파이 조인트 베이스 라미네이트는 기존 프로토타입 하부 날개 스킨(수지 주입 후 경화된 평직 스프레드 토우 라미네이트)에 조립 페이스트 접착제를 사용하여 2차 접착될 예정이다. 최종 파이 조인트 설치 시 기판의 표면 에너지 특성을 정확하게 시뮬레이션하기 위해 요소 수준 테스트용 복합 라미네이트 섹션은 실제 하부 날개 스킨과 동일한 직물, 주입 에폭시 및 후경화 처리를 사용하여 제작되었다.
- 복합재료를 사용할 경우, 최종 조립체의 강도는 사용되는 물리적 재료뿐만 아니라 정확한 제작 및 접합 공정에 의해서도 결정된다. 초기 계획에서는 진공 백킹을 이용하여 기존 중앙 날개 부분 형상에 파이 조인트를 설치하는 동안 조립 접착제가 경화되는 동안 클램핑 압력을 가했다. 기존의 중앙 날개 박스 구조를 제거한 후, 하부 날개 스킨 몰드를 지지대로 사용하여 좌우 날개의 상반각과 받음각을 유지했다.
- 금형 구조와 연동되도록 복잡한 클램핑 장치를 제작할 수도 있었지만, 조립 과정에서 진공 백의 압력 차이를 이용하여 균일한 클램핑 압력을 가하는 것이 더 효율적이고 안정적이었다. 요소 수준 테스트 샘플은 일반적으로 크기가 작고, 이 경우에는 간단한 수동 클램프를 사용하여 접합할 수도 있었지만, 의도했던 진공 백 방식을 사용하여 샘플을 제작했다. 이는 초기 데이터베이스 테스트가 진공 경화로 인해 날개 구조에서 나타날 수 있는 균일한 접합층 두께와 환경 관련 강도 특성을 더 정확하게 시뮬레이션할 수 있음을 의미한다. 초기 요소 수준 테스트 결과는 예상되는 새로운 접합 강도 요구 사항과 비교했을 때 면외 방향 강도가 유의미하게 증가하는 것을 보여주었으며, 파이 접합 방식을 더욱 발전시킬 수 있는 충분한

근거를 제공했다.

파이 조인트 설계 개선으로 다양한 성능 향상

- RS: 접합부 제작 매개변수를 결정하기 위해 새로운 컴퓨터 시뮬레이션에 크게 의존하는 대신, 기존 날개 설계 모델과 새로운 근사 계산을 활용하여 새로운 강도 요구 사항에 맞춰 접합부 설계를 대략적으로 조정했다.

- DarkAero1 추가적인 요소 테스트에는 예상되는 제조상의 결함에 대한 파이 접합부 구성의 민감도 특성 분석 및 적층 설계 개선이 포함되었다. 허니콤 패널 전단 웹 접착층 두께, 클램핑 압력, 접합부 치수 공차 및 맞춤도와 같은 변수들을 신속하게 테스트하여 시제품 날개 부품에 대한 대략적인 합격 기준을 설정했다.



- 단방향(UD) 누들 단면적 및 플라이 방향 순서와 같은 적층 설계 매개변수를 변경하여 접합부 성능을 간략하게 개선했다.

- 파이 접합부의 첫 번째 파손은 UD 누들 근처 또는 관통하는 박리였으며, 그 후 낮은 수준의 면외 하중이 계속 발생했다.
- 파이 조인트의 최종 파손률은 맞대기 조인트보다 250% 이상 높았다.
- 파이 접합부의 최종 파손 원인은 수직 기둥과 바닥 적층판 사이의 박리였다.



- 요소 수준 테스트 결과, 벌집형 패널과 날개 외피 사이의 파이 접합부의 면외 방향 최초 파괴 강도는 기존 맞대기 접합부의 극한 강도에 비해 300% 이상 증가했다. 하지만 성능 향상은 이것만이 아니었다.

그림 19. 중앙 날개에 설치하기 전의 다중 파이 접합 구조물이다. 이 주요 구조 요소는 오토클레이브 처리 없이 상온에서 보관한 프리프레그를 사용하여 제작되었다. 중앙 날개 부분의 물리적 공간 제약으로 인해 적절한 설치를 위해 세 부분으로 나누어 제작해야 했다. 출처 | DarkAero

- 맞대기 접합 시험편의 파손 모드는 매우 미미한 강도 및 강성 감소를 보이며 최종 파손의 약 85% 지점에서 발생하는 미묘한 초기 파손 징후였다. 최종 파손은 하부 기판에서의 응집 파손 또는 하부 적층판 파손을 통해 발생했다. 이와 대조적으로, 파이 접합 시험편은 UD 누들 근처 또는 관통하는 박리를 통해 초기 파손을 경험했다. 이 초기 파손은 탄성 증가로 인해 반력 하중이 일시적으로 감소한 후, 추가적인 파손이 발생하는 동안에도 낮은 수준의 면외 하중을 계속 견뎠다. 파이 접합의 최종 파손은 초기 파손보다 변동성이 컸지만, 맞대기 접합의 최대 강도보다 250% 이상 높은 것으로 측정되었다. 파이 접합의 최종 파손은 거의 모두 모의 하

부 날개 표면의 접착선 또는 표면에서의 박리가 아닌, 수직 부재와 파이 접합 기저 적층판 사이의 박리를 통해 발생했다.

다중 파이 접합 구조

- 중앙 날개에 설치하기 전의 다중 파이 접합 구조물이다. 이 주요 구조 요소는 오토 클레이브 처리 없이 상온에서 보관한 프리프레그를 사용하여 제작되었다. 중앙 날개 부분의 물리적 공간 제약으로 인해 적절한 설치를 위해 세 부분으로 나누어 제작해야 했다.

- 접합 강도, 재료 및 조립 방법에 대한 특성 분석이 완료됨에 따라 개발 노력은 다중 파이 접합부에 대한 간략하고 상세한 테스트로 전환되었다. 이 다중 파이 접합부는 DarkAero1 날개의 중앙 전단 웨브 5개를 구성하는 촘촘하게 배치된(중심 간 거리 2인치) 평행 파이 접합부이다. 중앙 날개 박스 조립체의 하중 특성에 대한 이해가 더욱 깊어짐에 따라, 연구팀은 중앙 날개에 더 큰 크기의 다중 파이 접합부를 제작, 검사 및 설치했다.



그림 20. 수정된 DarkAero 1 중앙 날개 박스 구조의 가조립은 날개 구조 외부에서 수행할 수 있다. 하부 날개 표면의 곡률은 하부 파이 조인트 끝 부분에서 확인할 수 있다. 출처 | DarkAero

- 치수 및 제조 공정 제약으로 인해 기존 날개 강도를 성공적으로 향상시킬 가능성이 거의 없어 보였지만, 체계적인 개발 작업과 단계별 접근 방식을 통해 설계 업데이트를 구현하면서 새로운 설계에 대한 충분한 확신을 확보할 수 있었다. 재설계된 DarkAero1 날개의 전체 구성 요소 정적 하중 시험을 통해 재설계된 구조가 양의 양력 및 음의 양력 조건 모두에서 더 넓은 고속 돌풍 작동 범위에 적합함을 최종적으로 검증했다. 전체 날개 어셈블리의 강성 증가, 즉 하중 적용 시 날개 끝단의 변형량을 실시간으로 기록하는 것은 매우 고무적인 일이었다. 이전에는 고려하지 않았던 사항이지만, g당 날개 끝단 변형량이 25% 이상 감소했다.
- GG: 스투베에 따르면, 최종적으로 완성된 파이 조인트 조립 방식은 날개 구조에 몇 파운드의 무게를 더했지만, 돌풍 하중에 대한 구조적 여유를 확보하는 데에는 그만한 가치가 있었다고 한다. 팀 전체는 파이 조인트 재설계가 성공해서 정말 기뻐했다. "이 문제는 명확한 해답이 없는 엔지니어링 문제처럼 보였다. 상충되는 요구 사항과 엄격한 제약 조건이 너무 많았거든요. 우리는 맞대기 접합에서 파이 조인트 조립 방식으로 전환하면서 접착제 도포, 접착층 두께 및 다공성, 경화, 설치 접근성 등 제조 공정까지 모두 검증했다. 이 모든 문제를 해결했고, 첫 시도에 성공했다." 그럼에도 불구하고, 팀은 DarkAero1이 실제로 생산에 들어갈 때를 대비해 이미 다음 버전을 개발하고 있다.

DarkAero1 센터 윙 박스 개조

- 수정된 DarkAero1 중앙 날개 박스 구조의 가조립은 날개 구조 외부에서 수행할 수 있다. 하부 날개 표면의 곡률은 하부 파이 조인트 끝 부분에서 확인할 수 있다.
- RS: 시제기 날개에 사용된 정확한 다중 파이 조인트 설계는 향후 양산형 설계와 직접적인 연관성이 없다. 개조 과정에서 효율적인 제작을 위해 이상적이지 않은 설계 절충이 불가피했기 때문이다. 양산 단계에서는 모든 조립 단계를 처음부터 고려하여 구조물을 제작할 수 있으므로, 대량 생산 시 신뢰성을 높이기 위해 정확한 제조 기술과 조인트 형상을 더욱 최적화할 수 있다.
- 예를 들어, 파이 조인트 형상을 하부 날개 스킨 라미네이트와 직접 성형 및 동시 경화할 수 있다. 또한, 하이브리드 파이 조인트와 전단 웹 형태의 특징을 결합하여 2차 접착 단계를 없앨 수 있으며, 중앙 날개 박스 구조를 인접한 형상과 더욱 매끄럽게 통합할 수 있다. 파이 조인트는 초기 손상 후 잔류 강도가 더 높은 것으로 나타났지만, 라미네이트 스티칭 또는 터프팅, Z-피닝, 또는 파이 조인트 형상의 3D 직조 직물 등을 통해 조인트의 손상 허용치를 더욱 높일 수 있다.
- DarkAero팀은 엔지니어링이나 제조 분야의 어떤 응용 분야든 특정 공정이나 재료에 지나치게 의존하지 않고, 프로젝트 요구 사항을 지속적으로 참조하여 설계 및 제조 솔루션을 도출하려고 노력한다. 때로는 실제 테스트 데이터를 얻기 위해 물리적 하드웨어를 제작하는 것이 계산 분석보다 빠르고 정확할 수 있으며, 이번 센터 스파 수정 작업은 이러한 방식으로 해결해야 할 흥미로운 엔지니어링 문제였다.
- GG: DarkAero는 혁신적인 복합 소재 솔루션을 보다 저렴한 가격으로 제공하기 위해 노력하고 있다. 스투베는 "대부분의 회사는 파이 조인트 제작에 훨씬 더 비싼 방법을 사용해 왔으며, 이는 긴 내부 승인 절차도 필요로 했다."라고 말하며, "우리는 빠듯한 예산으로 더 빠르게 움직여야 한다."라고 덧붙였다.

□ 독일 FRC, 소재 연구의 새로운 시대로의 비약적인 도약(26.05.22.)

※ [Chemie] 재료 연구의 새로운 시대로의 비약적인 도약 / News

- <https://www.chemie.de/news/1188744/ein-quantensprung-in-eine-neue-aura-der-materialforschung.html>
- <https://www.chemie.de/news/1162030/erfolgreiche-anwendung-des-maschinellen-lernens-fuer-die-entdeckung-neuer-polymere.html>
- #독일 #양자컴퓨터 #인공지능 #소재개발 #재료연구

- 저렴한 의약품, 치솟는 에너지 비용, 전략적 원자재 공급에 대한 의존도 등 여러 현안을 해결하는 데 있어 신소재는 핵심적인 역할을 한다. 그러나 기존의 소재 개발 방식은 시간이 오래 걸리고 종종 수년이 소요된다.
- 이에 Fraunhofer 규산염 연구소(FRC, Fraunhofer Institute for Silicate Research)는 디지털 기술, 머신러닝, 인공지능(AI)을 기반으로 한 가속 개발 방식("소재 가속")을 연구하고 있다. 양자 컴퓨터를 활용하면 개발 속도를 더욱 높이고 소재 분야를 더욱 폭넓게 탐구할 수 있을 것으로 기대된다. FRC는 양자 컴퓨팅 분야에서 검증된 전문성을 보유한 이탈리아 기업 알고리즘(Algorithmiq)과 양해각서(MoU)를 체결하여 이 분야에서의 협력을 강화하고자 한다.
- Fraunhofer 실리케이트 연구소(ISC, Fraunhofer Institute for Silicate Research)는 다양한 물질의 화학적 합성에 대한 풍부한 경험을 보유하고 있다. 그러나 기존의 실험실 합성 방식은 시간이 많이 소요된다. 원하는 물질 특성과 가공성을 얻기 위해서는 새로운 물질에 대한 수많은 실험을 반복해야 한다. 디지털 방식은 개발 과정을 가속화할 수 있는 가능성을 제시한다. 구조-물성 관계에 대한 시뮬레이션과 계산을 통해 부적합한 변형체를 조기에 제거하고, 유망한 후보 물질을 구체적으로 식별할 수 있다.
- 하지만 이러한 과정의 기본 원리는 매우 복잡하다. 양자 역학적 다입자 시스템의 동역학을 완벽하게 설명하려면 오늘날의 고성능 컴퓨터에서도 매우 긴 계산 시간이 필요하다. 예를 들어, 양자 컴퓨팅은 특히 자원 효율이 높은 고성능 자기 물질("희토류 저합금 자석" 또는 "갭 자석") 탐색을 크게 가속화하고, 물질 공간을 전례 없는 수준으로 확장할 수 있도록 해줄 것이다.

양자 컴퓨팅 – 물질 세계의 잠재력을 더욱 빠르고 포괄적으로 실현

- Algorithmiq(이탈리아 밀라노)는 양자 컴퓨팅 기업으로, 신약 개발 및 분자 시뮬레이션을 위한 양자 기반 알고리즘 개발을 전문으로 한다. Algorithmiq의 핵심 목표는 기존 시뮬레이션(예: 고전 양자 화학, 분자 동역학 시뮬레이션)으로는 불가능했던 훨씬 더 정확하고 효율적인 방식으로 분자의 특성과 동역학을 계산하는 것이

다. 화학 및 생명 과학 분야의 난제들을 해결하기 위해 특별히 설계된 이러한 양자 알고리즘이 아직 완벽하지 않은 현재의 양자 컴퓨터에서도 작동하도록 하기 위해, Algorithmiq 팀은 고전 컴퓨터와 양자 컴퓨터가 협력하는 하이브리드 방식을 사용한다. 양자 컴퓨터는 분자에서 특히 어려운 양자 효과를 계산하고, 고전 컴퓨터는 최적화 및 평가를 담당한다. 이러한 방식은 화학에서 흔히 사용되는 구조와 원리를 활용하여 하드웨어 제약에도 불구하고 분자와 그 특성에 대한 가장 신뢰할 수 있는 예측을 제공하도록 설계되었다.

- 이제 연구진은 생명과학 분야에서 주로 활용되는 양자 컴퓨팅 개념을 화학 소재 개발로 확장하는 것을 목표로 하고 있다. 이 개념은 지난 4월 Wellcome Leap재단으로부터 "복잡한 치료법을 시뮬레이션하기 위한 완전한 양자-고전 워크플로우를 최초로 시연하여 생명과학 분야에서 단기적인 양자 우위를 확보할 수 있는 확실한 길을 열었다"는 공로로 200만 달러의 상금을 받았다. 이를 위해 연구진은 화학 소재 합성 및 디지털화 분야의 전문성을 제공하는 Fraunhofer ISC와 전략적 파트너십을 체결했다.

복잡한 문제를 더욱 효율적으로 해결

- Fraunhofer ISC 소장인 미리암 운터라스 교수는 이번 협력의 목표에 대해 "초기에는 시뮬레이션을 통해 우리가 찾고 있던 소재는 아니지만, 그 특성이 유망한 소재 등 소재 지식의 공백을 쉽게 파악할 수 있다."라고 설명한다.
- 또 다른 목표는 시뮬레이션을 통해 소재 공간에 대한 이해를 높이고 새로운 솔루션을 더 빠르게 찾는 것이다. "미래에도 사회적으로 의미 있는 혁신을 창출하기 위해서는 연구자들의 창의력이 계속 필요할 것이다.
- 하지만 도구는 점점 더 디지털화되고 있으며, 실제 합성과 더불어 디지털 트윈이 매우 중요해질 것이다. 디지털 트윈을 통해 모든 실험 단계를 재현하지 않고도 제품 수명 주기 전반에 걸쳐 소재 합성, 제품 특성, 재활용을 통한 회수 등을 예측할 수 있게 될 것이다." 따라서 양자 컴퓨터를 이러한 복잡한 문제 해결에 통합하는 것은 소재 개발을 가속화하는 데 중요한 단계이다.
- Algorithmiq의 CEO이자 공동 창립자인 사브리나 마니스칼코는 다음과 같이 덧붙였다. "오랫동안 양자 컴퓨팅에 대한 전 세계적인 논의는 거의 하드웨어에만 집중되어 왔다. 하지만 하드웨어만으로는 충분하지 않다. 알고리즘과 소프트웨어 분야에서 획기적인 발전이 없다면, 양자 컴퓨터는 과학적으로는 인상적이지만 실질적인 산업적 가치를 제공하지 못할 위험에 처하게 된다. Algorithmiq은 화학, 생명 과학, 신소재 등 다양한 분야에서 양자 컴퓨터를 진정으로 유용하게 만들어 줄 알고리즘 레이어를 구축하고 있다."
- 2026년 6월, 파트너사인 Algorithmiq와 Fraunhofer ISC는 경영진 회의를 통해 첫

번째 공동 프로젝트와 그 방향에 대해 논의할 예정이다.



그림 21. 미리암 운터라스 교수(왼쪽)와 사브리나 마니스칼코 교수(오른쪽)는 양자 컴퓨팅을 재료 연구에 활용할 수 있도록 연구 자원 공동 활용. 출처 | CHEMIE