

# 우주항공용 자율 손상회복형 복합소재 개발

- 굵히고 갈라져도 스스로 되살아나, 극한의 우주에서 구조물을 지킨다 -

ARIES : Development of Aerospace Reusable and Intelligent Engineered Structures

문서번호

ASTRA01\_2601PPR1

담당PM

유지함 책임PM

|                  |                                               |            |                                                                                                                  |                |                                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 세부사업명<br>[내역사업명] | 미래개척융합과학기술개발사업[미래유망융합기술파이오니어(도전형 - 한계돌파 R&D)] |            |                                                                                                                  |                |                                                                       |
| 지원정보<br>(과제별)    | [기간] 4년(2단계: 2+2)<br>[규모] 연간 4억원 내외           | 공모유형       | <input type="checkbox"/> 지정공모<br><input checked="" type="checkbox"/> 품목공모(분야공모)<br><input type="checkbox"/> 자유공모 | 보안과제<br>여부     | <input type="checkbox"/> 보안<br><input checked="" type="checkbox"/> 일반 |
| 지원<br>과제 수       | 2개 내외                                         | 세부<br>프로그램 | -                                                                                                                | 연구개발기관<br>구성요건 | -                                                                     |

## 1. 연구주제 개요

### □ 한계돌파 질문

극저온·내압 반복운용으로 발생한 복합재 손상을 스스로 감지·복구하여  
구조성과 기밀성을 회복할 수 있는가?

### □ 핵심내용

#### ○ 연구 개요

- 현용 고강도 탄소섬유 복합재의 구조성을 유지하면서, 극저온·내압 반복환경에서 발생하는 미세균열과 계면·층간 손상을 스스로 회복하여 기밀성과 구조안정성을 유지하는 재사용 우주구조 복합재 개발

• 연구대상: T1100G급 또는 동등 수준 이상의 고강도 탄소섬유를 적용한 고분자 매트릭스 복합재 및 극저온 압력구조

• 핵심 연구범위: 손상 발생·감지부터 자가복구, 복구 후 구조성능 및 기밀성 검증까지의 전주기 손상회복 시스템 구현

• 예상 최종 KPI ※PM과 협의를 통해 조정 가능

✓ 초기 구조성능 유지: 기준 복합재 대비 강도·강성 각각  $\geq 90\%$

✓ 복구 후 구조성능 회복: 재냉각·재가압 후 주요 구조성능  $\geq 90\%$

✓ 기밀성 회복: 손상으로 증가한 누설량의 95% 이상 제거 및 복구 후 허용

누설량 이하

✓ 동일 영역 반복복구: 3회 이상 손상·복구 반복

✓ 극저온 반복환경 내구성: 300회 이상

✓ 손상감지 신뢰성 자율 검증: 탐지 확률 90% 이상 및 95% 신뢰수준 입증

#### ○ 단계별 목표

- 1단계(2년): 고강도 자가복구 복합소재 및 손상회복 메커니즘 구현

- 2단계(2년): 극저온·내압 반복환경에서 자가복구 및 구조·기밀성 회복성능 검증

## 2. 추진배경 및 기대효과

### □ 글로벌 현황 및 전망

○ 우주항공산업의 발사체 재사용과 장기 우주임무에 대응하기 위해, 경량성과 내구성을 확보하고 반복사용에 따른 점검·정비 부담을 줄이는 고신뢰성 복합재 기술이 요구됨

○ 현재 발사체에는 알루미늄계 합금, 스테인리스강, 탄소섬유 복합재가 부위별로 적용되고 있으며, Falcon 9은 금속 추진제 탱크와 복합재 외부 구조를 병용하고 Starship은 스테인리스강을 채택하는 등 중량·제작성·비용·사용환경을 고려한 소재 최적화가 이루어지고 있음

○ 탄소섬유를 합성수지로 결합한 복합재는 가벼우면서 높은 강도를 확보할 수 있어 적용 범위가 확대되고 있으며, Rocket Lab은 Electron의 복합재 구조 비행 경험을 바탕으로 대형 복합재 탱크와 구조체를 적용한 재사용 발사체 Neutron을 개발하고 있음

○ 미국항공우주국(NASA)은 대형 복합재 액체수소 탱크의 지상시험을 통해 극저온 환경에서의 적용 가능성을 확인하였으며, 유럽우주국(ESA)은 Phoebus 사업을 통해 금속 추진제 탱크를 복합재로 대체하기 위한 경량화 및 기밀성 검증을 추진하고 있음

○ 다만 복합재는 극저온과 내부 압력이 반복적으로 작용할 때 미세균열과 내부 손상이 발생할 수 있어, 추진제가 새지 않도록 하는 기밀성과 하중을 견디는 구조성능을 동시에 유지하는 것이 주요 기술과제로 남아 있음

## □ 복합재 주요 이슈

- 복합재 성능은 탄소섬유 자체뿐 아니라 섬유를 묶는 수지, 섬유와 수지가 맞닿는 경계면, 여러 층 사이의 결합상태에 의해 결정됨
- 복합재의 적용 확대를 위한 기술 과제는 서로 다른 성질의 재료가 결합된 상태에서 균열과 손상을 얼마나 잘 억제하는지가 핵심임
  - 특히 중요한 재료적 과제는 극저온에서의 미세균열 발생, 계면·층간 손상의 축적, 손상에 따른 기밀성 저하임
  - 이들 문제는 서로 연결되어 있어, 높은 초기 강도만 확보하거나 특정 재료의 성능만 개선하는 방식으로서는 충분히 해결하기 어려움

## ○ 주요 이슈

- 온도가 내려갈 때 탄소섬유와 수지가 수축하는 정도가 달라, 수지에 미세균열이 발생할 수 있음. 따라서 섬유의 높은 강도뿐 아니라 수지의 균열 저항성 확보가 중요
- 반복적인 온도·압력 변화로 섬유와 수지의 결합면이나 재료층 사이가 손상되어 구조성능이 저하될 수 있음. 고강도 탄소섬유를 사용하더라도 이러한 결합부의 내구성은 별도 확보가 필요
- 기체가 수지를 투과하거나 연결된 균열을 통해 누설될 수 있음. 따라서 하중을 견디는 구조성능과 추진제가 새지 않는 기밀성을 동시에 확보해야 함
- 액체산소와 직접 접촉하는 복합재는 극저온 성능뿐 아니라 산소 환경에서의 화학적 안전성을 충족해야 함. 일반 구조용 수지를 그대로 적용하기보다 추진제에 적합한 재료 조합을 검증해야 함
- 균열 저항성을 높이기 위한 수지 조성 변경이나 첨가제 사용이 강성·내열성 등 다른 성능에 영향을 줄 수 있음. 따라서 특정 성능의 개선보다 요구 성능을 함께 만족하는 재료 설계가 필요

## □ 주요 연구개발 현황 및 향후 개발과제

- 나노입자를 이용한 수지의 열수축 조절과 미세균열 억제<sup>호주 연구진 등, 2023년</sup>
  - 탄소섬유와 수지의 열수축 차이를 줄이기 위해, 에폭시 수지에 열팽창 특성을 조절하는 텅스텐산 지르코늄 나노입자를 넣는 연구를 수행
  - 표면을 처리한 나노입자를 중량 기준 1% 첨가한 결과, 미첨가 재료 대비 수

지의 열팽창계수는 20% 감소하고, 균열이 진행되는 데 필요한 에너지인 수지의 파괴에너지는 140% 증가

- 영하 196℃, 약 77K에서 복합재의 층간 파괴에너지가 약 100% 증가했으며, 시험한 적층구조에서는 미세균열 발생을 억제
- 소재·적층판 시험 결과로, 액체수소 탱크의 기밀성이나 반복재사용 수명까지 입증한 것은 아님

○ 얇은 나노섬유층을 이용한 기체 차단성과 반복저온 내구성 개선 KAIST, 2026년

- 복합재의 층 사이에 매우 얇은 폴리아미드 나노섬유층을 넣어, 내부 빈 공간과 미세균열을 줄이는 기술을 개발
- 일반적인 오픈 경화 복합재와 비교하여 기체 투과도가 21% 감소했으며, 300회 극저온 사이클 이후에도 나노섬유층을 적용한 시편에서는 미세균열이 관찰되지 않음
- 적은 재료 추가로 균열 억제와 기체 차단성을 함께 개선한 사례이나, 성과는 적층판 시험 수준

○ 대형 복합재 액체수소 탱크의 제작·저장시험 NASA·Boeing CCTD 사업, 2014~2015년 실증

- 탄소섬유·에폭시와 얇은 적층재를 적용하여 직경 2.4m 및 5.5m 복합재 탱크를 제작하고 액체수소 시험을 수행. 5.5m 탱크는 약 20K의 액체수소 조건에서 20~53psi, 약 0.14~0.37MPa 범위의 압력 반복시험을 수행
- 본 사업은 복합재가 작은 시편을 넘어 대형 액체수소 저장구조로 제작·시험될 수 있음을 보여준 대표적인 선행 사례. 후속 기술보고서는 알루미늄-리튬 탱크 대비 30~40% 경량화 가능성을 제시

○ 추진제에 적합한 수지·적층구조를 적용한 라이너 없는 탱크 개발 유럽 ESA·ArianeGroup·MT Aerospace Phoebus 사업, 2025년

- Phoebus는 별도의 내부 차단막인 라이너 없이 복합재 자체로 추진제를 저장하는 탱크를 개발하는 사업

- 복합재의 산소 적합성과 균열 억제 성능을 함께 확보하려는 개발 사례로, 산소와 저온에 견디는 수지를 선정하고 적층구조를 최적화 및 직경 2m급 탱크의 액체산소 저장 실증을 바탕으로 직경 3.5m급 탱크의 제작으로 확대

- 액체수소용으로는 60L 소형 탱크에서 약 20K의 액체수소를 누설 없이 저장한 결과가 공개, 이후 직경 2m·약 2,600L 탱크로 확대하는 개발계획이 제시

- 공개 발표에는 구체적인 누설 검출한계가 제시되지 않아 ‘누설 없음’을 무제한의 완전 기밀로 해석해서는 안 됨

○ 손상감지·국부가열·자가복구 기능의 통합 유럽 ESA CASSANDRA 사업, 2026년

- 치유 가능한 탄소섬유 복합재에 광섬유 센서와 가열장치를 통합. 센서로 손상 위치를 확인하고, 내장된 가열망을 이용해 100~140℃로 가열하여 초기 균열을 복구하는 방식을 적용. 시험 규모는 2×10cm 시편부터 40×40cm 패널까지이며, 손상감지·가열·자가복구와 극저온 탱크 환경을 고려한 열충격 시험을 수행
- 본 사업의 의미는 치유 가능한 재료를 센서·가열장치와 결합하여 하나의 복구 체계로 구현했다는 점
- 다만 완성된 극저온 탱크 적용은 후속 단계이며, 해당 공식 발표에서는 강도 회복률, 기밀성 회복률, 동일 부위의 반복 복구 횟수와 같은 정량 성능이 제시되지 않음

○ 반복 자가복구 횟수의 확대 미국 노스캐롤라이나주립대·휴스턴대, 2026년

- 유리섬유·에폭시 복합재에 열가소성 치유층과 내장 히터를 적용하여 1,000회의 층간 손상·복구 시험을 수행
- 복구는 표면 목표온도 약 130℃에서 15분간 가열하는 방식으로 진행. 일반 비치유 복합재의 층간 파괴저항을 기준으로 비교했을 때, 복구 후 성능은 초기 약 175%에서 반복시험 후 약 60%까지 감소.
- 반복복구 기술의 가능성과 함께 사용 횟수가 늘어날수록 복구성능이 저하되는 문제를 보여줌

○ 극저온 손상 후 가열복구와 재시험을 연결한 초기 연구 영국 퀸메리언던대·Graphene Innovations Manchester, 2026년

- 탄소섬유·에폭시에 열가소성 치유재를 층 사이에 넣거나 섬유 표면에 도포하고, 약 77K에서 손상을 가한 뒤 가열복구하는 과정을 4회 반복
- 층 사이에 치유재를 넣은 시편은 최종 시험에서 해당 시편 자체의 초기 강성 대비 약 93%를 유지한 것으로 보고
- 다만 복구에는 외부 가열·가압장치를 사용하여 150℃·5bar에서 1시간이 필요했으며, 극저온 상태에서 직접 복구한 것은 아님. 또한 치유재 도입에 따른 초기 강성 저하가 있었고, 기체 투과도나 누설률은 측정하지 않음

○ 종합 평가 및 향후 개발과제

- 주요 개발성과는 나노개질 수지를 통한 균열 저항성 향상, 얇은 기능층을 통한 기체 차단성·반복저온 내구성 개선, 대형 액체수소 탱크의 지상시험, 손상감지와 반복복구 기능의 구현임
- 그러나 기체 투과도 감소, 강성 유지율, 층간 파괴저항, 반복복구 횟수는 서로 다른 지표이며, 각 연구의 수치를 합쳐 하나의 소재가 모든 성능을 달성한 것은 아님
- 실제 극저온 압력탱크에서 초기 구조성능을 유지하면서 손상 후 구조성능과 기밀성을 반복적으로 회복·검증한 통합 성과까지는 확인되지 않음
- 향후 핵심 과제는 실제 탱크의 안전한 반복사용과 연관된 복합재의 개발임

## □ 기획 의도

- 세계적으로 균열·누설 억제와 소재·패널 수준의 자가복구 기술은 발전하고 있으나, 극저온·내압 반복환경에서 손상을 자율 감지·복구하고 구조성능과 기밀성을 반복 회복하는 통합 기술은 아직 실증이 부족
- 본 연구는 고강도 탄소섬유 복합재의 초기 성능을 유지하면서, 극저온·내압 손상을 복구하고 구조성능과 기밀성을 검증하고, 차세대 복합재 개발을 목표로 함
- 이를 통해 국내 차세대 발사체의 메탄 기반 재사용 방식으로 전환에 맞추어, 반복적인 극저온·압력·열기계 하중을 견디는 복합재의 장기 신뢰성을 확보하고 핵심 소재 기술 및 연관 산업 육성의 기반을 구축함
- 핵심 연구 영역

### 1. 초기 구조성능유지

- 자가복구 기능이 없는 기준 복합재 대비 강도·강성 각각 90% 이상
- 미국 NEI ‘자가복구 섬유강화복합재의 최근 기술 발전’ 연구인 ‘손상된 압력용기의 파열 성능을 무손상 대비 약 95% 수준으로 회복’ 준용하며, 동일 부위의 반복 손상·복구를 포함

### 2. 복구 후 구조성능 회복

- 재냉각·재가압 후 주요 구조성능 90% 이상 회복
- 미국 NEI ‘자가복구 섬유강화복합재의 최근 기술 발전’ 연구를 준용하며, 반복 극저온 환경과 기능 통합을 반영

### 3. 기밀성 회복

- 손상으로 증가한 누설량의 95% 이상 제거하고, 복구 후 허용 누설량 이하 충족
- KAIST ‘나노섬유층 활용한 기체 투과도 약 21% 감소 및 300회 극저온 열 사이클 후 시편에서 미세균열 미발생 연구’ 결과를 준용하며, NASA의 누설 시험 기준인 최대 허용 누설량을 검증과 허용량의 절반 이하 누설을 검출할 수 있어야 한다는 규정을 적용

### 4. 동일 영역 반복 복구

- 같은 손상영역에서 3회 이상 손상·복구 반복
- 미국 NC State·휴스턴대의 상온에서 손상시험과 가열복구를 한 연구인 유리섬유·에폭시 복합재에서 1,000회 층간 손상·복구 연구를 준용
- 본 연구에서 3회는 일회성 효과를 넘어 두 번째·세 번째 손상에도 복구 기능이 지속되는지 확인하기 위한 최소 반복 실증 목표로, 매회 극저온·내압 조건으로 되돌린 뒤 구조성능과 기밀성을 함께 충족 여부를 평가

### 5. 극저온 반복환경 내구성

- 300회 이상 극저온 반복환경 노출 후 주요 구조성능의 90% 이상과 허용 기밀성을 유지하고, 이후 손상에 대해서도 복구성능을 검증
- KAIST의 300회 극저온 열사이클 후 미세균열 억제 성과를 비교 목표 기준으로 설정

### 6. 손상감지 신뢰성 및 자율 검증

- 정의된 최소 검출대상 손상에 대해 탐지확률 90% 이상을 95% 신뢰수준으로 입증
- 유럽 우주재료 비파괴검사 표준 ECSS의 ‘탐지확률 90% 및 신뢰수준 95%’ 평가체계 적용

### 7. 기능 통합에 따른 추가 질량

- 최종 5% 이하
- 경량화 이점을 보존하기 위한 도전목표로서, 1번 목표인 초기 강도 손실 10% 허용 목표와 충돌 시 조정 가능

## □ 기대효과

### ○ (사회경제적 효과)

#### - 예상 시장규모

##### • 우주항공용 복합재 탱크 시장 규모 전망

✓ 발사체용 탱크 시장<sup>TBRC</sup>: 2025년 17억 250만 달러 → 2030년 22억 2,800만 달러, CAGR 5.53%

✓ 위성 추진제 탱크 시장<sup>MarketsandMarkets</sup>: 2026년 7억 3,000만 달러 → 2032년 12억 7,000만 달러, CAGR 9.6%

##### • 기술 확보 시, 대체시장 규모 전망

✓ 발사체용 탱크 시장 소재 대체 시,

| 적용 가능 비중 | 2030년 잠재시장 | 2035년 잠재시장 |
|----------|------------|------------|
| 40%      | 8.9억 달러    | 11.7억 달러   |
| 60%      | 13.4억 달러   | 17.5억 달러   |
| 80%      | 17.8억 달러   | 23.3억 달러   |

✓ 위성 추진제 탱크 시장으로 확장 시,

| 적용 가능 비중 | 2030년 잠재시장 | 2035년 잠재시장 |
|----------|------------|------------|
| 40%      | 4.2억 달러    | 6.7억 달러    |
| 60%      | 6.3억 달러    | 10.0억 달러   |
| 80%      | 8.4억 달러    | 13.4억 달러   |

✓ 그 외 접근 가능시장

- 탄소복합재 압력용기<sup>Stratview</sup>: 2025년 21억 달러 → 2031년 59억 달러, CAGR 18.6%

- 금속 대체 검토 중인 압력용기<sup>Stratview</sup>: 2025년 76억 달러 → 2031년 131억 달러, CAGR 9.5%

#### - 국가적 성과

• 독자적 재사용 우주수송 기술 확보: ‘발사할 수 있는 능력’에서 ‘반복 운용할 수 있는 능력’으로 확장

• 발사체·위성 등 국가 우주자산의 손실 위험 감소: 미세손상을 큰 누설·파손으로 발전하기 전 관리

## - 산업적 성과

- 발사체 제작·운영의 경제성 개선: 경량 복합소재 적용에 따른 수송효율 향상 및 자가복구에 따른 점검·수리·교체 부담 경감

- ✓ 발사·운영비 대상 반복원가의 약 1~5%, 수송량 증가 반영한 kg당 운송 원가 약 5~10% 절감 가능

- ✓ 중형 재사용 수송시스템 적용 가정 시, 회당 반복원가 약 4,000만 달러 중 직접 순절감액은 회당 약 38만 ~ 200만 달러 절감 가능※Falcon 9 표준 발사서비스

스 및 NASA NEO Surveyor 발사 계약 적용

- ✓ NASA의 복합재 활용에 따른 30~40% 중량 절감 목표 가정 시, 회당 반복원가 약 5% 감소, 회당 수송량 약 6% 증가, kg당 운송원가 약 11% 감소 등 예상 절감 원가 적용 시, 연 20회 운용 시 약 4,200만 달러 절감 가능

- 국내 소재·부품·장비 공급망 확대: 자가복구 수지, 프리프레그, 기밀 기능층, 센서, 히터, 제어모듈 등 전분야에서 사업화 및 고부가가치 제품 개발 촉진

- 민간기업의 사업화·수출 기반 마련: 소재 공급, 탱크·압력구조 공동설계, 기술이전, 검사·복구 서비스 등 사업모델 확대 및 국내외 공급망 진입 기반 확보

- 인접 산업으로 기술확산: 수소항공, 수소 저장·운송, 위성용 압력용기 등

## ○ (수혜자)

- 정부·우주기관: 재사용 우주수송체의 안전성·신뢰성 향상 및 발사·운영비 절감

- 발사체·위성·항공기 제작기업: 극저온 추진체 탱크 및 고강도 복합재 구조의 경량화, 내구성 및 반복 재사용성 향상

- 소재·부품·정비기업: 자가복구 매트릭스·계면 및 고성능 CFRP 관련 핵심 소재·부품의 신규시장 확보

- 우주비행체 운용기관: 반복 운용에 따른 구조손상 및 추진제 누설 위험 감소와 점검·정비 부담 경감

- 항공·무인기·에너지 저장용기 관련 산업: 고신뢰성·장수명 복합재 기술의 파급을 통한 제품 성능 및 산업경쟁력 향상

### 3. 과제 목표 및 범위

#### □ 최종 목표

- 현재 분절되어 있는 구조복구·기밀복구·극저온·반복내압·반복자가복구 기술을 하나의 소재에서 통합 실증
  - 소재기술을 실제 구조기술로 전환, 개별 우수성보다 동시 충족성 검증, 실제 우주운용 시나리오 검증 등을 통한 자기복구 후 재사용 가능성을 증명

#### ○ 핵심 연구범위

- T1100G급 또는 동등 수준 이상의 고강도 탄소섬유를 적용한 자가복구 복합재 소재·구조 설계
- 미세균열, 섬유-수지 계면손상 및 층간박리의 감지·위치판별 기술
- 손상부위 선택적·국부 복구 및 동일 부위 반복복구 기술
- 복구 후 강도·강성·층간성능 및 기밀성 회복 여부 확인 기술
- 극저온·내압·반복 열사이클 환경에서 자가복구 기능 및 구조건전성 검증

※ 연구범위, 마일스톤, 핵심 KPI 등은 과제 선정 후 책임PM과의 협의로 확정

#### ○ (단계별 목표 방향)

- 1단계: 고강도 자가복구 복합재 및 손상회복 메커니즘 구현
  - 고강도 탄소섬유 복합재의 초기 강도·강성 저하를 최소화하면서 미세균열, 계면손상 및 층간박리를 복구할 수 있는 소재·계면·구조 설계
  - 초기 구조성능 유지율, 손상 후 구조성능 회복률 및 반복복구 가능성을 정량적으로 검증
  - 자가복구 소재 및 기능층이 기존 복합재의 제조성과 구조성능에 미치는 영향 평가
  - 주요 KPI(案)
    - ✓ 초기 강도 유지율: 기준 복합재 대비  $\geq 95\%$
    - ✓ 초기 강성 유지율: 기준 복합재 대비  $\geq 95\%$
    - ✓ 미세균열 손상 후 재료 성능 회복률: 최초 손상 전 성능 대비  $\geq 90\%$
    - ✓ 섬유-수지 계면 결합 회복률: 최초 손상 전 계면 결합력 대비  $\geq 90\%$
    - ✓ 층간 파괴인성 회복률: 최초 손상 전 파괴 인성 대비  $\geq 90\%$
    - ✓ 동일 손상영역 반복 복구 성능: 5회 이상 손상·복구 반복, 매회 해당 회

## 복성능 목표 충족

- 2단계: 극저온·내압 반복환경에서 자가복구 및 구조·기밀성 회복성능 검증
  - 손상감지-위치판별-국부복구-복구 후 성능확인 기능을 복합재 구조에 통합
  - 극저온·내압·반복 열사이클 환경에서 자가복구 기능 및 구조건전성 검증
  - 손상 후 구조성능 90% 이상 회복, 동일 부위 3회 이상 반복복구 및 기밀성 회복 가능성 검증
  - 주요 KPI(案)
    - ✓ 초기 구조성능 유지: 기준 복합재 대비 강도·강성 각각  $\geq 90\%$
    - ✓ 복구 후 구조성능 회복: 재냉각·재가압 후 주요 구조성능  $\geq 90\%$
    - ✓ 기밀성 회복: 손상으로 증가한 누설량의 95% 이상 제거 및 복구 후 허용 누설량 이하
    - ✓ 동일 영역 반복복구: 3회 이상 손상·복구 반복
    - ✓ 극저온 반복환경 내구성: 300회 이상
    - ✓ 손상감지 신뢰성 자율 검증: 탐지 확률 90% 이상, 95% 신뢰수준 입증
    - ✓ 기능 통합에 따른 추가 질량: 최종 5% 이하

※ 단계/연차별 확정 마일스톤은 과제 선정 후, 책임PM과의 협의로 확정

## □ 연구개발계획서 필수 포함 사항

### ○ 적용대상 및 운용환경 정의

- 적용 구조에서 예상되는 미세균열, 섬유-수지 계면손상, 층간박리 등 핵심 손상유형과 손상 발생·복구 시나리오 제시
- 극저온, 내압, 반복 열사이클, 충격 등 실제 적용 대상에서 요구되는 주요 운용환경과 시험조건 제시

### ○ 자가복구 소재·구조 및 정량 성능목표 설정

- T1100G급 또는 동등 수준 이상의 고강도 탄소섬유를 적용한 자가복구 복합재의 소재·계면·구조 설계방안 제시
- 초기 구조성능 유지율, 손상 후 구조성능 및 기밀성 회복률, 동일 부위 반복 복구 횟수, 기능 추가에 따른 질량 증가 등 핵심 정량목표 설정
- 손상감지 정확도, 복구에 필요한 온도·시간·에너지 등 자율 손상관리 시스템 구현에 필요한 성능지표 제시

## ○ 손상감지-복구-성능확인 통합기술 개발계획

- 손상 발생 및 위치 감지, 선택적·국부 복구, 복구 후 구조성능과 기밀성 확인까지의 전 과정 통합방안 제시
- 센서, 가열 또는 기타 복구 수단을 적용하는 경우 기존 복합재 구조성능과 제조성에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 설계방안 제시
- 충격, 반복하중, 극저온, 가압·감압, 기밀성 및 반복 열사이클 시험을 통해 손상 발생-복구-성능회복 전 과정을 정량 검증하는 방안 제시

## ○ 위험요인 및 대체기술·전환기준 설정

- 자가복구 기능 적용에 따른 초기 강도·강성 저하, 반복복구 성능 감소, 감지 오류, 복구에너지 증가, 기능층 추가에 따른 질량 증가 및 제조결함 등 주요 기술위험을 사전에 정의
- 주요 KPI 미달 시 적용 가능한 대체 소재·복구 메커니즘·감지기술 및 구조설계 대안을 제시
- 단계별 핵심 성능목표 달성 여부에 따른 연구 지속·보완·전환 기준을 구체적으로 설정

## □ 제공 성과물

### ○ 고강도·경량 자가복구 복합재 시제품

- T1100G급 또는 동등 수준 이상의 고강도 탄소섬유를 적용하고, 미세균열·계면손상·층간박리에 대한 반복복구 기능을 구현한 시트·프리프레그·적층재 형태의 복합재 시제품

### ○ 자가복구 기능 통합형 복합재 구조체

- 손상감지, 위치판별, 선택적 국부복구 및 복구 후 성능확인 기능을 통합한 평판 및 곡면 복합재 구조체
- 극저온·내압·반복 열사이클 환경에서 반복복구 기능과 구조건전성을 검증할 수 있는 구조 시제품

### ○ 우주용 압력구조 부분구조 실증체

- 실제 적용환경을 모사한 극저온·가압·감압·반복 열사이클 조건에서 손상감지부터 복구, 구조성능 및 기밀성 회복까지 전 과정을 실증한 결과물

### ○ 설계·제조·시험평가 기술자료

- 손상감지 및 복구 제어방법, 구조성능·기밀성 평가절차 및 시험방법
- 충격, 극저온, 내압, 반복 열사이클, 기밀성 및 반복복구 시험 데이터와 성능 평가 결과

#### □ 지원 제외 범위

- 단순 표면 손상 치유 또는 1회성 복구에 그치고, 미세균열·계면손상·층간박리에 대한 반복복구 성능을 검증하지 않는 연구
- 손상감지 센서, 가열·치료장치, 복구재료 등 개별 요소기술만을 개발하고 손상 감지-국부복구-복구 후 성능확인 기능을 복합재 구조에 통합하지 않는 연구
- 외부 작업자의 직접 수리 또는 외부 보수재 주입에 의존하는 연구
- 자가복구 기능 적용 후 강도·강성 등 구조성능 또는 기밀성 회복을 정량적으로 검증하지 않는 연구
- 고강도·경량 CFRP의 초기 구조성능을 과도하게 저하시키거나, 기능 추가에 따른 질량 증가·제조성 저하 등으로 실제 적용 가능성이 낮은 연구

## ■ 4. 연구개발 수행 및 관리 방안

#### □ 연구개발 지원 규모 및 수행기간

- 선정 예상 과제 수: 2개 내외
- 예산 규모: 연간 8억 원 내외(과제별 4억원 내외)
- 연구 기간: 최대 48개월 이내
- 연구 진행 단계: 최대 2단계(각 단계 24개월)
- 책임PM과 한계도전전략센터는 프로젝트의 최종목표 달성을 위해 연구성과 및 기술적 리스크를 지속적으로 점검하고, 그 결과에 따라 과제의 범위와 목표 등을 조정할 수 있음

#### □ 마일스톤 기반 연구관리 및 단계(Go/No-Go) 점검

- 연구 제안자께서는 각 단계 목표 달성을 위한 각 단계 내 복수의 마일스톤을 구체적으로 제시 요망

- 마일스톤 설정 시에는 과제 수행 중간단계에서 적용할 수 있는 성능지표와 관련 세부 업무내용이 포함되어야 함. 제안자께서는 전체 프로그램 일정을 준수하시고 모든 프로그램 목표, 지표, 중간단계 및 최종 성과물을 문제 해결 관점에서 제시 요망
- 본 한계도전 R&D에서는 목표 달성을 위해 책임PM이 수시로 연구수행자와 소통하며, 매 분기 현장방문과 전문가 패널 리뷰 미팅을 통해 연구과정의 지식화와 진화적 위험 관리를 추진함
- 책임PM은 단계(Go/No-Go) 점검을 통해 연구자께서 설정하신 마일스톤 목표의 달성 여부 및 최종목표 달성 가능성을 확인하고 다음 단계 연구과제의 진행 여부를 결정함

#### □ 연구성과 및 결과물 제출

- 연구책임자께서는 연구 수행기간 동안 최소한 다음과 같은 연구 결과물을 제공하셔야 하며, 책임PM의 요청에 따라 추가 자료 및 데이터를 제공하셔야 함
  - 분기별 책임PM과의 회의(현장방문, 전문가 리뷰)에서 연구수행의 진척상황을 파악할 수 있는 실험데이터 및 결과 요약자료
  - 성과 수준을 판단할 수 있는 연구결과 산출물
  - 연구수행 과정에서의 의미 있는 성과물 또는 시행착오에 대한 대응방안 등 연구자의 목표 달성 노력을 입증할 수 있는 자료 등

## [별첨 1] 주요 참고문헌

1. Nandi, A., Lagron, A., Koenig, A., Monson, C., Golder, M. R., Koratkar, N., & Vashisth, A. (2026), "Reversing damage for improved compression after impact in vitrimer composites," *Composites Part B: Engineering*, 314, 113438.
2. Xie, G.-H., Xia, H.-Y., Lin, Z.-H., Xu, S., & Yuan, S.-Q. (2026), "Self-Healing CFRP Laminates with CNT-EMAA Thermoplastic System: Experimental and Quantitative Characterization," *Composites Part B: Engineering*, 309, 113010.
3. Turicek, J. S., Phillips, Z. J., Nakshatrala, K. B., & Patrick, J. F. (2026), "Self-healing for the long haul: In situ automation delivers century-scale fracture recovery in structural composites," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 123(2), e2523447123.
4. Higuchi, R., Kumada, M., Zusho, Y., Yokozeki, T., & Suzuki, T. (2026), "Damage and self-healing behaviors in aircraft-grade carbon fiber reinforced vitrimer unidirectional laminates containing exchangeable disulfide crosslinks," *Composites Part B: Engineering*, 310, 113184.
5. Lopez-Olmedo, A., Frassine, R., & Longana, M. L. (2025), "Towards repairable composites: healing of mode I and mode II delaminations in woven glass fibre and vitrimer matrix laminates," *Composites Part B: Engineering*, 305, 112738.
6. Turicek, J. S. et al. (2025), "Tailoring interlaminar shear and mode-I fracture behavior in fiber-composites via soft self-healing thermoplastic inclusions," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 194, 108803.
7. Snyder, A. D., Turicek, J. S., Diesendruck, C. E., Varley, R. J., & Patrick, J. F. (2024), "Unraveling chemical and rheological mechanisms of self-healing with EMAA thermoplastics in fiber-reinforced epoxy composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 185, 108271.
8. Bhattacharyya, A., Saha, S., Jena, S., Nguyen, H. T., Tran, D. T., Kim, N. H., & Lee, J. H. (2025), "Epoxy-based vitrimeric semi-interpenetrating network/MXene nanocomposites for hydrogen gas barrier applications," *Nanoscale*, 17, 5755-5769.
9. Bae, J., Jin, J., Yun, J., Park, S., & Lee, J. (2026), "Nano-engineered permeation barriers for composite laminates: Polyamide nanofiber interlayers for cryogenic cycling durability and gas-barrier performance," *Composites Part B: Engineering*, 311, 113219.
10. Koord, J., Kumazawa, H., Fischer, A., Ebina, T., Völkerink, O., & Hühne, C. (2026), "Investigation of permeability and leakage in composite materials for application in cryogenic storage systems," *Composites Part B: Engineering*, 316, 113580.
11. Bodaghi, M. et al. (2026), "A review of technical challenges and research gaps to address permeability controls in cryogenic composite hydrogen tanks," *Composites Part B: Engineering*, 315, 113427.
12. ESA (2026), Project Cassandra, "Self-repairing spacecraft could change future missions," European Space Agency, 3 March 2026.
13. Teijin Limited (2026), "Teijin Develops New Thermosetting Carbon Fiber-reinforced Plastic Combining Self-healing Functionality with Recyclability," 21 July 2026.
14. Zhang, Z., Tie, Y., Fan, C., Yin, Z., & Li, C. (2024), "Multiscale Analysis of Impact-Resistance in Self-Healing Poly(ethylene-co-methacrylic acid) (EMAA) Plain Woven Composites," *Polymers*, 16(19), 2740.