

CT 이미지-카오스 반딧불이 알고리즘 기반 C/C 복합재료의 멀티스케일 물성 특성화 방법

강지훈* · 윤군진**,***†

A CT-Informed Multiscale Material Characterization for C/C Composites with Chaos Firefly Algorithm

Ji-Hoon Kang*, Gun Jin Yun**,***†

ABSTRACT: A CT-informed multiscale material characterization framework is proposed to identify the effective mechanical properties of carbon/carbon (C/C) composites used as thermal protection systems (TPS) for reusable launch vehicles. C/C composites exhibit highly heterogeneous and multi-scale microstructures — tow architecture, carbon matrix, and a wide pore distribution — so that single-scale analysis cannot accurately describe their effective properties across length scales. To address this, three-dimensional digital microstructures of C/C composites are reconstructed from high- and low-resolution micro-CT images, and microscale and mesoscale representative volume elements (RVEs) are constructed accordingly. Computational homogenization is performed at the microscale to obtain the effective properties of fiber tows, which are subsequently transferred to the mesoscale RVE consisting of tow, matrix, and voids. The homogenized mesoscale properties are finally used as the macroscale specimen-level material input. A chaotic firefly algorithm (CFA) based inverse characterization scheme is integrated into the framework to identify constituent properties that cannot be obtained from direct bulk experiments. The proposed framework provides a CT-informed multiscale characterization route that delivers consistent effective mechanical properties of C/C composites from microstructure to specimen scale, providing a basis for future thermo-mechanical and ablation analyses.

초 록: 본 연구에서는 재사용 발사체의 열 보호 시스템(Thermal Protection System, TPS)에 적용되는 탄소/탄소(Carbon/Carbon, C/C) 복합재의 유효 기계적 물성을 특성화하기 위한 CT 이미지 기반 멀티스케일 물성 특성화 프레임워크를 제안한다. C/C 복합재는 섬유 토우, 탄화 매트릭스 및 광범위한 공극 분포로 구성된 강한 비균질·다중스케일 미세구조를 가지므로, 단일 스케일에서의 특성화만으로는 각 스케일의 유효 물성을 정확히 도출하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 고해상도 및 저해상도 마이크로 CT 이미지로부터 C/C 복합재의 3차원 디지털 미세구조를 재구성하고, 이를 기반으로 마이크로스케일 및 메조스케일 대표체적요소(Representative Volume Element, RVE)를 구축한다. 마이크로스케일에서는 계산 균질화를 수행하여 섬유 토우의 유효 물성을 도출하고, 이를 토우, 매트릭스 및 기공으로 구성된 메조스케일 RVE에 전달한다. 이후 균질화된 메조스케일 물성은 매크로스케일 시편 해석을 위한 재료 입력값으로 사용된다. 또한 직접적인 벌크 실험으로 측정하기 어려운 구성재 물성을 식별하기 위해 카오스 반딧불이 알고리즘(Chaotic Firefly Algorithm, CFA) 기반의 역해석 물성 식별 기법을 프레임워크에 통합하였다. 제안된 프레임워크는 CT로부터 정량화된 C/C 복합재의 미세구조 정보를 입력으로 하여 마이크로-메조-매크로 스케일의 유효 기계적 물성을 일관되게 특성화하는 경로를 제공하며, 향후 C/C 복합재의 열-기계 연성 해석 및 삭마 해석을 위한 기반을 제공한다.

Received 1 June 2026, received in revised form 19 June 2026, accepted 25 July 2026

*Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, South Korea

**Department of Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, South Korea

***Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Seoul 08826, South Korea

†Corresponding author (E-mail: gunjin.yun@snu.ac.kr)

Key Words: C/C 복합재(C/C composite), 멀티스케일 물성 특성화(Multiscale material characterization), 대표 체적 모델(Representative volume element), 마이크로 CT (Micro-computed tomography), 열 보호 시스템(Thermal protection system)

1. 서 론

재사용 우주발사체와 초고속 비행체의 개발이 본격화되면서, 초고온 환경에서도 구조적 신뢰성을 유지할 수 있는 열 보호 시스템(Thermal Protection System, TPS) 소재에 대한 수요가 빠르게 증가하고 있다[1]. TPS 적용 환경에서는 수천 도에 달하는 공력 가열, 산화, 그리고 반복적인 열 사이클 하중이 동시에 작용하므로, 종래의 금속계 소재로는 구조적 안정성을 유지하기 어렵다. 이에 따라 탄소섬유 강화 탄소 복합재(carbon/carbon composite, 이하 C/C 복합재), C/SiC 세라믹 복합재, CF/SiC 하이브리드 복합재 등 초고온 환경에 적합한 비산화물 및 산화물 기반 복합재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-5]. 특히 C/C 복합재는 비강도와 비강성이 우수하고 2,000°C 이상의 고온에서도 기계적 물성이 유지되는 특성으로 인해 가장 유망한 TPS 후보 소재 중 하나로 주목받고 있다[6].

초고온 복합재 분야에서는 스크램제트 재생냉각 연소기를 위한 C/SiC 복합소재의 중간전단 및 접합부 강도 평가[7], 초저궤도(VLEO) 위성용 산화물/산화물 세라믹 복합재의 원자산소 저항 거동 평가[8], 초경량 CF/SiC 하이브리드 복합섬유의 고온 보호 성능 향상[9], 다중 산란 메커니즘을 활용한 3D 프린팅 코어게이트 코어 광대역 전파흡수 샌드위치 복합재 구조 설계[10] 등 응용 환경별 특화된 연구가 다수 보고되어 왔다. 이러한 연구들은 초고온 환경에서의 복합재 손상 및 거동 메커니즘에 대한 중요한 통찰을 제공하고 있으나, 대부분 시편 단위의 거시적 시험 결과 또는 특정 환경에 한정된 평가에 머물러 있어, 미세구조 진화와 거시 거동을 정량적으로 연결하는 통합적 해석 기반의 부재가 한계로 지적되어 왔다.

한편, 탄소섬유 강화 복합재(CFRP)에 대한 탄소섬유 표면 처리, 계면 결합, 함침 공정, 적층 설계가 거시 물성에 미치는 영향에 관한 연구가 폭넓게 이루어졌다. CF/PEEK 복합재의 전도 용접 성능에 대한 pitch계 탄소섬유 stitching density의 영향[11], CFRP 재활용 기술이 회수된 탄소섬유의 물리적 특성에 미치는 영향[12], CFRP 제조 시 Veil 사용에 따른 계면물성 변화[13], CF/LMPAEK 열가소성 Blank의 비접촉 유도 가열을 활용한 동시 성형 접합 공정과 기계적 물성 평가[14], 접착제 없는 CFRP 샌드위치 구조의 Mode-II 지배 굴곡 하중 하에서의 계면 신뢰성 평가[15] 등이 보고되었다. 이들 연구는 앞선 연구와 달리 물질의 구성재 및 계면 수준의 변화가 거시적 거동에 어떻게 반영되는지를

실험적으로 탐구하였으나, 이러한 연구들은 대부분 비교적 균질한 고분자 매트릭스 기반 시스템에 초점이 맞춰져 있어, C/C 복합재와 같이 강한 비균질성과 다공성을 동반하는 탄화 매트릭스 시스템에 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 미세구조 정보를 직접 반영하는 멀티스케일 해석 및 데이터 기반 모델링 기법이 활발히 연구되고 있다. 평균장(mean field) 균질화 이론에 기반한 멀티스케일 피로 수명 모델[16], 직조 패턴에 따른 3축 브레이드 복합재의 기계적 물성 분석[17] 등이 대표적인 예시이다.

그러나 이상의 선행 연구들은 대부분 (i) CFRP를 비롯한 고분자 매트릭스 복합재에 한정되거나, (ii) 거시 시편의 평균 응답에 초점을 두고 있으며, (iii) 미세구조의 형상 정보를 반영하더라도 이상화된 RVE에 머무르는 경우가 많다. C/C 복합재는 일반적인 CFRP와 달리 탄화 매트릭스, 탄소섬유 토우, 그리고 광범위한 공극이 공존하는 강한 비균질·다공성 미세구조를 가지며, 단일 시편 내에서도 위치별 미세구조의 차이가 크게 나타난다[16,18]. 이러한 비균질성은 열전달 경로와 하중 전달 경로를 동시에 변화시키므로, 거시 스케일에서의 응답을 정확하게 예측하기 위해서는 미세구조 정보를 직접 반영한 멀티스케일 해석이 필수적이다. 이를 위하여, 최근에는 컴퓨터 단층촬영(Computed Tomography, CT) 기술의 발전으로 복합재 내부의 3차원 미세구조를 비파괴적으로 정밀하게 관측함으로써 실제 시편의 형상 정보를 직접 반영한 이미지 기반 RVE(Representative Volume Element) 모델링이 활발히 시도되고 있다. 특히 C/C 복합재와 같이 공극 분포가 복잡한 비균질 소재에서는, CT 이미지로부터 추출된 섬유, 기지, 공극 상의 정량 정보를 RVE에 직접 반영함으로써 평균장 이론으로 포착하기 어려운 국부적 응력 집중과 비균질성을 보다 현실적으로 표현할 수 있다.

본 연구에서는 저온 탄화된 C/C 복합재의 CT 정보를 직접 반영한 이미지 기반 멀티스케일 기계적 물성 특성화 프레임워크를 제안한다. 제안 프레임워크는 (i) 고배율/저배율 CT 데이터로부터 섬유, 섬유다발(tow), 기지, 공극 상을 분리하고 그 부피분율을 정량화하는 이미지 처리 과정, (ii) 마이크로 및 메조 스케일 RVE의 구축과 전산균질화를 통한 스케일별 유효 기계적 물성의 도출, (iii) 카오스 반딧불이 알고리즘(Chaotic Firefly Algorithm, CFA) 기반의 역 특성화를 통한 미시 구성재 물성 식별, 그리고 (iv) 거시 시편 인장 시험과의 비교를 통한 특성화 결과의 검증으로 구성

된다. 본 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. 2장에서는 시편 정보와 CT 기반 미세구조 정량화 결과를 정리하고, 3장에서는 마이크로/메조 RVE의 구축과 멀티스케일 브릿징 절차를 기술한다. 4장에서는 멀티스케일 특성화 알고리즘과 시뮬레이션 결과를 제시하며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. C/C복합재 시편 및 CT 기반 미세구조 정량화

2.1 C/C 소재 시편 정보

C/C 복합재는 일반적으로 탄소섬유 프리프레그 또는 직조 프리폼에 콜타르 피치(coal tar pitch)와 같은 전구체(precursor)를 함침한 뒤, 경화와 열분해(탄화) 단계를 수차례 반복하는 PIP 공정을 통해 제조된다. 본 연구에 사용된 소재는 Toray advanced Composites Corporation에서 제작한 T300 소재의 탄소 섬유에 페놀계 기지재를 채운 프리프레그를 N층으로 쌓아 고온, 고압 공정을 진행, 이후 콜타르 피치에 함침 및 경화/탄화를 다회 반복하여 제작된 시편을 사용하였다(Fig. 1). 사용한 T300 탄소 섬유에 대한 구체적인 물성은 Table 1에 명시되어 있다.

2.2 CT 이미지 기반 미세구조 정량화

본 연구에서 사용된 장비는 서울대 공동기기원의 Xradia 620 Versa 고분해능 3차원 X선 이미징 시스템이다. 먼저 저온 탄화된 2D 직조 C/C 시편에 대해 두 가지 해상도의 마이크로 CT 촬영을 수행하였다. Fig. 2에서와 같이 저배율 CT는 시편 전체 영역에서 직조 형상과 섬유다발/기지/기지 공극의 분포를 파악하기 위한 메조스케일(tow level) 관측에 활용되고(a), 고배율 CT는 단일 섬유 수준에서의 배열, 기

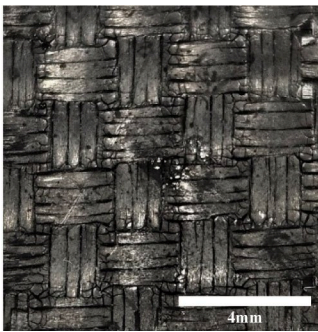


Fig. 1. 2D Woven C/C Composite Specimen

Table 1. Material Properties of T300 Carbon fiber [19]

Fiber	T300	T700
Density	1.76 g/cm ³	1.80 g/cm ³
Tensile Strength	3.53 GPa	4.9 GPa
Young's Modulus	230 GPa	230 GPa
Fiber Diameter	7 μ m	7 μ m

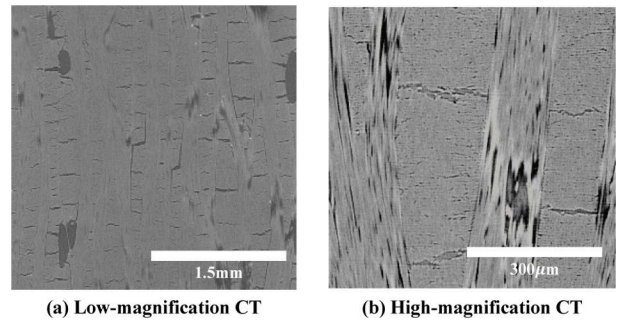


Fig. 2. CT image of C/C composite

Table 2. Volume fractions of constituents quantified from micro- and meso-scale CT images

Scale	Fiber [%]	Tow [%]	Matrix [%]	Void [%]
Micro	52.4	-	34.2	13.4
Meso	-	64.7	27.1	8.2

지 충전 정도, 미세 공극의 분포를 관측하기 위한 마이크로 스케일(fiber level) 관측에 활용되었다(b). 고배율과 저배율의 촬영 전압은 각각 120 kV와 80 kV이며, Pixel 크기는 각각 0.87 μ m와 5 μ m이다. 두 해상도의 데이터를 동시에 활용함으로써, 시편 전체의 거시적 구조와 국소적 미세구조를 일관되게 연결할 수 있다.

본 연구에서는 CT 이미지 처리를 (i) 그레이스케일 영상의 잡음 제거, (ii) 임계값 기반 분할, (iii) 섬유/기지/공극 상의 라벨링, (iv) 부피분율 정량화 단계로 수행하였다. 이를 통해 C/C 복합재의 다상(multi-phase) 분할 정확도를 향상시켰고, 그 결과 마이크로 스케일에서는 섬유 52.4%, 기지 34.2%, 공극 13.4%, 메조 스케일에서는 섬유다발 64.7%, 기지 27.1%, 공극 8.2%의 부피분율이 산출되었다(Table 2). 이러한 부피분율 정보는 다음 장의 RVE 구축에서 입력 조건으로 직접 사용된다. 마이크로 스케일에서는 부피분율뿐 아니라 분할된 CT이미지의 3차원 형상 정보 자체가 voxel 단위로 RVE에 매핑되어 섬유 및 공극의 크기, 형상, 분포가 반영되었다.

3. 멀티스케일 해석 체계

3.1 전산균질화를 통한 멀티스케일 브릿징

제안 프레임워크의 핵심은 마이크로-메조-매크로 세 스케일을 일관되게 연결하는 멀티스케일 균질화 절차이다. 마이크로 스케일에서는 섬유, 기지, 공극 3상의 RVE에 대해 전산균질화를 수행하여 섬유다발(tow) 단위의 직교이방성 유효 물성을 산출한다. 이렇게 얻어진 섬유다발의 유효 물성은 메조 스케일 RVE의 섬유다발 영역에 직접 할당되며, 메조 스케일에서는 섬유다발/기지/공극이 함께 모델

링된 RVE에 대해 다시 한 번 전산균질화를 수행하여 시편 단위의 거시 유효 물성을 도출한다. 이러한 멀티스케일 균질화 전략은 반도체 패키지의 다중물리 등가 모델링[20]이나 적층 복합재의 물리 정보 신경망 기반 응력 예측[21]에서 보고된 스케일 연계 방식과 유사한 철학을 공유한다.

전산균질화는 주기 경계 조건(Periodic Boundary Condition) 하에서 RVE에 대해 부과된 거시 변형률 ε^- 에 대응하는 평균 응력 σ^- 를 식 (1)과 같이 RVE 체적 V 위에서의 평균으로 정의함으로써 수행된다.

$$\sigma^- = \frac{1}{V} \int_V \sigma(x) dV, \varepsilon^- = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x) dV \quad (1)$$

이로부터 유효 강성 텐서 C_{eff} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma^- = C_{eff} : \varepsilon^- \quad (2)$$

주기 경계 조건은 RVE 외표면 ∂V 상에서 대향하는 두 점 x^+ 과 x^- 의 변위장이 부과된 거시 변형률에 의해 다음 식을 만족하도록 부과된다.

$$u(x^+) - u(x^-) = \bar{\varepsilon} \cdot (x^+ - x^-), \text{ on } \partial V \quad (3)$$

거시 강성 텐서 C_{eff} 의 모든 성분을 식별하기 위해 6개의 독립적인 단위 거시 변형률 상태 ($\bar{\varepsilon}_{11}, \bar{\varepsilon}_{22}, \bar{\varepsilon}_{33}, \bar{\varepsilon}_{12}, \bar{\varepsilon}_{23}, \bar{\varepsilon}_{31}$ 가 각

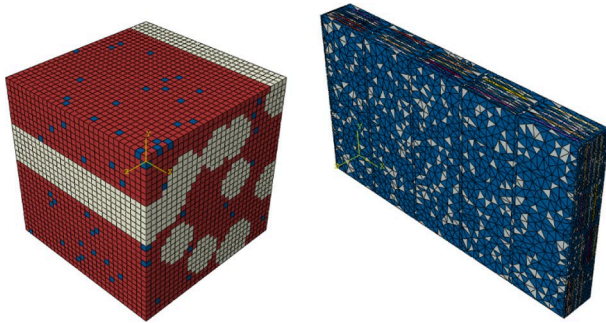


Fig. 3. Micro/Meso RVE

Table 3. Specifications of the microscale and mesoscale RVEs

	Micro RVE	Meso RVE
Domain size	30×30×30 μm	21.25×12×2.42 mm
Element size	1×1×1 (uniform level)	~0.52 (avg. edge length)
Mesh type	Hex voxel	Tetra
Element type	C3D8	C3D4
# Nodes	29791	13903
# Elements	27000	71695
# DOF	89373	41709
Constituents	Fiber/Matrix/Void	Tow/Matrix/Void

각 1, 나머지가 0인 케이스)를 순차적으로 부과하고, 각 케이스에서 식 (1), (2)에 따라 산출된 평균 응력을 강성 텐서의 한 열(column)로 조합하였다. RVE의 형상은 Fig. 3과 같으며, 채택된 마이크로/메조 RVE의 도메인 크기, 메쉬 유형, 요소·노드 수 및 자유도는 Table 3에 정리하였다. Micro Model의 경우 회색이 섬유, 붉은색이 기지, 파란 점들이 공극이며, Meso RVE의 경우 파란색이 기지, 회색이 공극, 나머지 색상으로 표현된 부분은 섬유다발이다. 각각의 RVE 전산균질화는 상용 유한요소 해석 패키지를 기반으로 수행되었으며, Micro RVE는 8절점 선형 육면체 요소(C3D8)로 CT이미지를 voxel요소 매핑으로 재구성하였고, Meso RVE는 CT에서 추출한 Tow 경로, 치수 계측값에 맞춘 준이상화 모델을 사용하여 4절점 사면체(C3D4)로 구성하였다. 섬유와 토우는 횡등방성(transversely isotropic) 선형 탄성체로, 탄화 매트릭스는 등방성 선형 탄성체로 모델링하였다. 공극상은 메쉬 연속성을 유지하면서 응력 전달에 기여하지 않도록 매우 낮은 강성을 갖는 가상 요소($E_v \approx 10^{-6} \times E_m$)로 처리하였다.

마이크로 스케일에서 도출된 섬유다발의 직교이방성 강성은 메조 스케일 RVE의 섬유다발 요소에 좌표계에 따라 회전 변환되어 할당된다. 메조 스케일에서 다시 균질화를 수행하면 직조 구조에 의한 비균질성과 공극의 영향이 반영된 거시 유효 강성을 얻을 수 있다[16,18].

3.2 멀티스케일 특성화: 카오스 반딧불이 알고리즘

C/C 복합재의 경우, 탄화 후 매트릭스(carbon matrix)의 단일재료 시험편을 직접 제작하여 시험하기 어렵고, 섬유-매트릭스 계면의 물성 또한 직접 계측하기 어렵기 때문에 모든 구성재 물성을 직접 실험으로 결정하는 것은 사실상 불가능하다. 분자동역학 기반 연구에서도 탄소섬유 표면의 화학적 특성과 매트릭스 사이의 계면 거동이 거시 함침 및 결합 거동에 결정적인 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다[22]. 이에 본 연구에서는 멀티스케일 시뮬레이션과 거시 시편 실험 결과를 비교하여 미시 구성재의 물성을 역해석(inverse identification)하는 멀티스케일 특성화 기법을 도입하였다. 최적화 알고리즘으로는 전역 최적화 성능이 우수한 카오스 반딧불이 알고리즘(Chaotic Firefly Algorithm, CFA)을 채택하였다[23].

역해석 대상 미시 구성재 파라미터는 직접 실험으로 결정하기 어려운 탄화 매트릭스의 등가 등방성 탄성 물성으로 한정하였다. 등방성 가정은 탄화 매트릭스 상에 한정되며, 복합재 수준의 이방성은 섬유의 횡등방성과 메조 스케일 직조 기하를 통해 균질화 결과에 반영된다. 페놀 유래 탄화 매트릭스는 결정자 배향이 무작위한 유리질 탄소로서 거시적 등방 가정이 타당하며, 면내 강성이 섬유 지배적인 C/C 복합재 특성상 매트릭스의 미소 이방성이 유효 물성에 미치는 영향은 제한적이다. 또한 역해석 관점에서 등방

Table 4. Search bounds of identified matrix parameters

	Min	Max
E_m	45000 MPa	80000 MPa
ν_m	0	0.45

성 가정은 식별 파라미터 수를 최소화하여 역문제의 적정성을 확보하는 역할을 한다. 구체적으로 매트릭스의 영률 E_m 과 푸아송비 ν_m 의 두 파라미터를 동시 식별 대상으로 설정하였으며, 전단계수 G_m 은 등방성 가정으로부터 종속적으로 산출된다. 각 파라미터의 물리적 의미와 탐색 범위는 Table 4에 정리하였으며, 탐색 범위는 페놀계 전구체로부터 얻어진 저밀도 탄화 매트릭스의 기존 보고값을 참고하여 설정하였다. 비현실적인 해로의 발산을 방지하기 위해 매 세대 갱신 후 모든 firefly의 위치는 탐색 상·하한으로 클리핑되어 가용 영역 내에 유지된다.

CFA 기반 멀티스케일 특성화 절차는 Fig. 4와 같다. 먼저 미시 구성재의 미시 물성에 대한 초기 모집단(initial fireflies)을 생성하고, 다음으로 각 개체에 대해 마이크로-메조-매크로 멀티스케일 FE 시뮬레이션을 수행하여 거시 하중-변위(F-D) 곡선을 계산한다. 시뮬레이션과 실험에서 얻은 F-D 곡선의 차이는 식 (4)과 같이 시뮬레이션 응답으로 정규화한 절대오차 합(normalized absolute residual sum) 형태의 목적함수로 정량화한다. 이때 거시 시편의 실험 데이터로는 디지털 이미지 상관법 등 고해상도 변형 측정 기법[24]으로 얻어진 응력-변형률 곡선을 활용할 수 있다.

$$Obj(p) = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{\{5\}} \sum_{i=1}^{\{N\}} \frac{|F_{sim,i}(p) - F_{exp,i}^k|}{|F_{sim,i}(p)|} \quad (4)$$

여기서 p 는 식별 대상이 되는 미시 구성재 물성 파라미터 벡터, $F_{sim,i}(p)$ 는 파라미터 p 로 수행된 멀티스케일 거시 시뮬레이션의 하중-변위 응답을 변위 구간 $0 \sim d_{max}$ 에서 균등 분할로 얻은 N 개 표본점에서의 하중 값이며, $F_{exp,i}^k$ 는 동일한 변위 표본점에서 보간된 k 번째 실험 시편 ($k = 1 \sim 5$)의 하중 값이다. 시뮬레이션과 실험 데이터의 보간은 선형 보간으로 수행하였으며, 초기 영점(변위 0)과 일부 실험 시편의 측정 범위를 벗어나 보간이 불가능한 표본점은 비교에서 제외하였다. 식 (4)의 정규화 형태는 변위 구간 전반에 걸쳐 응답이 작은 영역과 큰 영역의 기여를 균형 있게 반영하기 위해 채택되었다. CFA의 거동을 결정하는 주요 하이퍼파라미터는 모집단 크기 N , 최소 매력도 β_{min} , 빛 흡수 계수 γ , 무작위 이동 강도 α , 최대 세대 수 G_{max} , 그리고 카오스 맵의 종류 및 초기값이다. 각 firefly의 위치는 매 세대마다 자신보다 더 우월한(목적함수 값이 더 낮은) 모든 개체로부터 받는 인력 항과 카오스 시퀀스에 의해 변동하는 매력도, 그리고 탐색 공간 폭에 비례하는 무작위 이동 항의 합으로 갱신된다. 구체적인 갱신식은 다음과 같다.

Table 5. Hyperparameters of the chaotic firefly algorithm

Population size N	20
Maximum number of generations G_{max}	50
Total number of objective function evaluations	1000
Final randomization parameter α_f	1.0×10^{-6}
Randomness reduction factor α	$1 - \left(\frac{\alpha_f}{0.9}\right)^{(G_{max})^{-1}} \approx 0.249$
Minimum attractiveness β_{min}	0.2
Light absorption coefficient γ	1

$$\begin{aligned} \beta_{ij}^t &= (\beta_0^t - \beta_{min}) \exp(-\gamma r_{ij}^2) + \beta_{min} \\ \beta_0^t &= \beta_{min} + c^t \\ x_i^{t+1} &= (1 - \beta_{ij}^t)x_i^t + \beta_{ij}^t x_j^t + \alpha^t (\epsilon - 0.5) \odot s \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $r_{ij} = \|x_i^t - x_j^t\|$ 는 firefly i, j 사이의 유클리드 거리, $\epsilon \in [0, 1]^{(n_p)}$ 균등 분포 난수 벡터, $s = \mathbf{UB} - \mathbf{LB}$ 는 탐색 공간의 폭으로 정의되는 스케일 벡터이며, $\odot$ 는 요소별 곱이다. 무작위 이동 강도 α^t 는 세대 진행에 따라 지수적으로 감소시켜 후반 세대의 미세 탐색을 강화하였다. 카오스 시퀀스 $c^t \in (0, 1)$ 은 로지스틱 맵 $c^{t+1} = 4c^t(1 - c^t)$ 에 의해 갱신되며, 고정점 (0 또는 1) 부근으로의 퇴화를 방지하기 위해 매 세대 시작 시 시퀀스 값을 점검하여 필요 시 $[0.25, 0.75]$ 구간의 균등 난수로 재초기화한다. 매 세대 갱신 후 각 firefly의 위치는 탐색 상·하한 $[\mathbf{LB}, \mathbf{UB}]$ 으로 성분별 클리핑된다. 본 연구에서는 별도의 조기 종료 조건을 부과하지 않고 사전에 설정한 최대 세대 수 G_{max} 까지 탐색을 수행한 후 전 세대를 통틀어 가장 낮은 목적함수 값을 갖는 위치를 최종 식별 해로 채택하였다. 사용된 CFA의 하이퍼 파라미터, 카오스 맵의 종류 및 초기 조건, 그리고 식별 대상 파라미터의 탐색 범위는 Table 5에 정리하였다. 이 절차를 통해 단일재

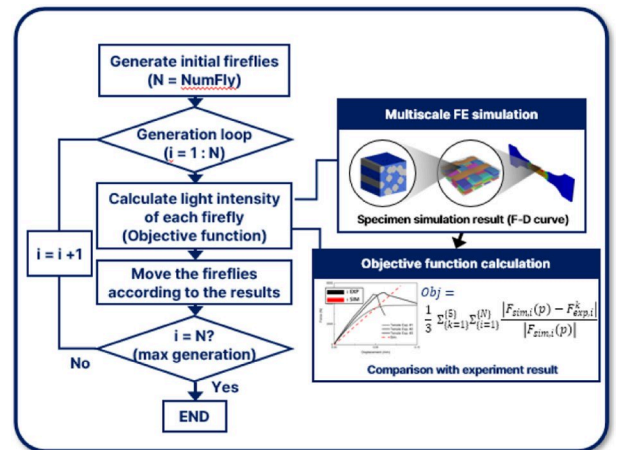
**Fig. 4.** Chaos Firefly Algorithm



Fig. 5. Flowchart of the proposed CT-informed multiscale framework

로 시험이 불가능한 탄화 매트릭스의 등가 물성 관련 파라미터를 일관되게 추정할 수 있다.

앞서 기술한 CT 기반 미세구조 정량화, 마이크로/메조 RVE 구축과 멀티스케일 균질화, CFA 기반 역 특성화 절차는 하나의 통합 프레임워크로 Fig. 5와 같이 구성된다. 멀티스케일 FE 해석은 상용 유한요소 해석 소프트웨어를 기반으로 수행되며, RVE 수준의 균질화 결과는 사용자 정의 재료 모델 형태로 거시 시편 해석에 전달된다. 이로써 CT로부터 정량화된 부피분율과 RVE 균질화로 도출된 물성을 일관된 입력으로 사용하여 거시적 거동을 예측할 수 있다.

4. 결 과

4.1 멀티스케일 균질화에 의한 유효 물성 예측

CT 정량화 결과로 얻어진 마이크로/메조 스케일 부피분율을 입력으로 하여, 각 스케일의 RVE에 대한 전산균질화를 수행하였다. 마이크로 스케일에서는 섬유와 탄화 매트릭스, 미세 공극의 3상 구성에 의해 섬유다발 단위의 직교 이방성 유효 물성이 산출되었으며, 섬유 방향(0° 방향)의 강성이 직각 방향(90° 방향)에 비해 현저히 큰 전형적인 직교 이방성 거동이 확인되었다(Table 6). 메조 스케일에서는 직조 패턴과 거시 공극의 영향으로 인해 마이크로 스케일에서 직접 평균한 결과보다 낮은 유효 물성이 도출되었으며, 이는 직조 구조에 의한 섬유다발의 굴곡(crimp)과 거시 공극에 의한 응력 전달 손실을 반영한 결과로 해석된다. 마이크로 및 메조 스케일 RVE의 국부 응력 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 단위 거시 변형률 $\bar{\epsilon}_{11} = 1$ 을 부과한 조건에서 산출된 마이크로 스케일 RVE의 von Mises 응력장(Fig. 6a)에서는 섬유 방향을 따라 응력이 집중적으로 전달되는 반면 매트릭스 영역에서는 상대적으로 낮은 응력 수준이 형성됨

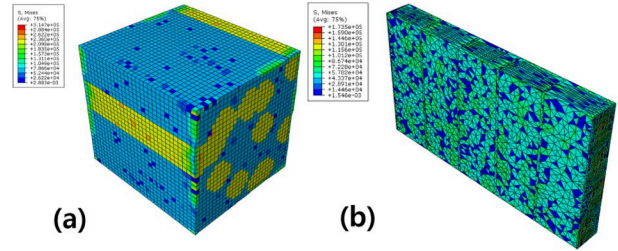


Fig. 6. von Mises stress contours of (a) Micro RVE and (b) Meso RVE under $\bar{\epsilon}_{11}=1$

이 확인되었다. 특히 미세 공극의 가장자리에서는 평균 응력 대비 수 배에 달하는 국부적 응력 집중이 관측되었으며, 이는 부피분을 평균만을 사용하는 평균장 이론으로는 포착하기 어려운 특징이다. 동일한 거시 변형률 부과 조건에서 평가된 메조 스케일 RVE의 응력장(Fig. 6b)에서는 직조 패턴에 따른 섬유다발의 굴곡(crimp) 영역과 거시 공극 주변에서 뚜렷한 응력 집중이 나타났다. 이러한 국부적 응력 비균질성은 거시 시편의 손상 개시 위치 및 파손 모드와 직접적으로 연관되므로, CT 기반 RVE를 통한 형상 정보의 직접 반영이 신뢰할 수 있는 거시 응답 예측에 필수적임을 시사한다.

4.2 CFA 기반 멀티스케일 특성화 결과

식별된 매트릭스 물성을 적용한 거시 시편 시뮬레이션의 하중-변위(F-D) 응답을 동일 조건의 인장 시험 5회(Test1-Test5)와 함께 Fig. 7에 도시하였다. 시뮬레이션 곡선은 식 (4)의 목적함수가 최소가 되는 매트릭스 물성에 대응하는 응답이며, 다섯 실험 시편 모두에 대한 잔차의 정규화 합을 동시에 최소화하는 방향으로 결정되었다. 식 (4)의 최종 수렴값 Obj_{min} 를 정량 지표로 사용하였으며, 이는 변위 $0 \sim 0.1$ mm 구간에서 시뮬레이션 응답으로 정규화한 평균 상대 오차가 약 2.7% 수준임을 의미한다. 변위 구간 $0 \sim 0.04$ mm의 준선형 영역에서 시뮬레이션 곡선이 다섯 실험 시편의 산포 내부에 위치함이 확인되었으며, CT 기반 RVE가 제공하는 미세구조 형상 정보가 역해석의 해 공간을 효과적으로 제약함으로써 CFA가 단일 실행으로 안정적인 해를 도출하였음을 보여준다. 다만 변위 0.04 mm 이상의 비선형 구간에서는 실험 곡선이 점진적인 강성 저하를 보이는 반면 시뮬레이션은 상대적으로 선형에 가까운 거동을 유지하였는데,

Table 6. Material Properties of C/C composite at 300K

	E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	E_{33} [GPa]	n_{12}	n_{23}	n_{31}	G_{12} [GPa]	G_{23} [GPa]	G_{31} [GPa]
Fiber	230	18	18	0.2	0.49	0.2	8.7	5.8	8.7
Tow	174.9	56.49	59.78	0.131	0.127	0.308	30.35	32	22.47
Matrix	67.56	67.56	67.56	0.1693	0.1693	0.1693	28.89	28.89	28.89
Macro	110.35	117.12	77.44	0.078	0.184	0.17	37.93	32.75	33.40

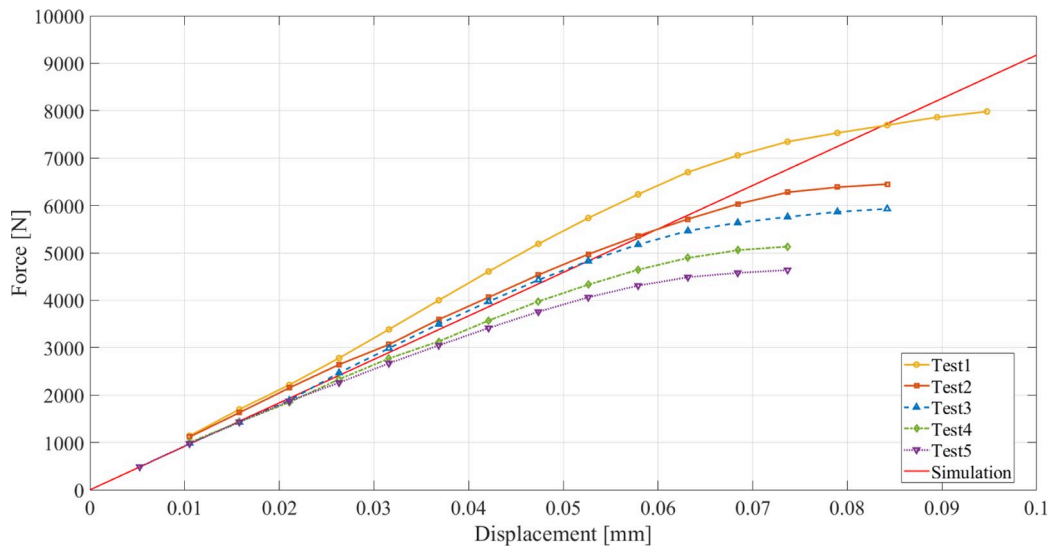


Fig. 7. F-D curve of C/C composite

이는 본 연구의 구성재 모델이 선형 탄성 가정에 기반하기 때문이며, 매트릭스 미세균열 및 섬유-매트릭스 계면 디본딩과 같은 비선형 손상 메커니즘은 향후 손상 모델의 도입을 통해 보완할 예정이다.

4.3 멀티스케일 기계적 물성 특성화 결과 종합

본 연구의 결과는 CT 정량화로 얻어진 부피분율과 거시 시편 인장 시험으로부터 얻어진 하중-변위 응답을 단일 특성화 프레임워크 내에서 일관되게 연결할 수 있음을 보여준다. 마이크로 스케일에서는 섬유, 탄화 매트릭스, 미세 공극의 3상이 공존하면서 직교이방성 토크 강성을 발생시키고(Table 6), 메조 스케일에서는 직조 구조에 의한 토크의 굴곡과 거시 공극이 추가로 응력 전달 손실을 유발하여 매크로 유효 강성이 마이크로 스케일의 단순 평균보다 낮게 특성화되는 경향이 확인되었다. CFA 기반 역 특성화는 단일 재료 시험이 불가능한 탄화 매트릭스의 등가 등방성 탄성 물성을 거시 응답과 일관된 형태로 식별함으로써, CT로부터 얻은 형상 정보와 거시 인장 시험의 응답 정보를 동시에 만족시키는 미시 구성재 물성을 안정적으로 특성화할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 제안한 절차는 환경 노출이나 손상 누적에 따라 미세구조와 구성재 물성이 비가역적으로 변화하는 C/SiC 접합부[7]나 산화물 세라믹 복합재[8]와 같은 시스템의 신뢰성 평가로도 자연스럽게 확장 가능하다.

한편 본 연구의 RVE는 단일 시편의 CT 데이터로부터 정량화된 부피분율과 voxel 형상 매핑에 기초하여 구축되었으므로, 제조 공정의 무작위성에 기인하는 시편 간 미세구조 변동성과 비주기적 결함을 통계적으로 포괄하지는 않는다. 다만 식별된 물성에 기반한 거시 시뮬레이션이 동일 조건 인장 시험 5회의 실험 산포 내부에 위치함(Fig. 7)은, 본 특성화 결과가 시편 간 변동을 포함한 거시 응답 범위를

대표할 수 있음을 부분적으로 뒷받침한다. 또한 제안 프레임워크는 특정 미세구조에 종속되지 않으며, 새로운 시편의 CT 데이터가 주어지면 동일한 절차로 재적용 가능한 일반적 특성화 경로라는 점에서 방법론 차원의 일반성을 갖는다.

5. 결 론

본 연구에서는 재사용 우주발사체용 TPS 소재로 주목받고 있는 C/C 복합재의 기계적 물성 특성화를 위한 CT 이미지 기반 멀티스케일 특성화 프레임워크를 제안하였다. 제안 프레임워크는 고배율/저배율 CT 이미지 처리로부터 마이크로 및 메조 스케일에서의 섬유, 섬유다발, 기지, 공극상의 부피분율을 정량화하며, 이를 바탕으로 구축된 마이크로/메조 RVE에 대한 전산균질화를 통해 거시 유효 물성을 도출한다. 또한 단일재료 시험이 어려운 탄화 매트릭스 물성을 결정하기 위해 카오스 반딧불이 알고리즘(CFA) 기반의 역 특성화 절차를 통합함으로써, 시편 수준의 실험 거동과 정합되는 미시 구성재 물성을 안정적으로 식별할 수 있도록 하였다. 향후에는 (i) 동일 프레임워크를 다양한 직조 패턴 및 밀도 수준의 C/C 시편에 확대 적용하여 일반화 성능을 평가하고, (ii) 동일 CT 볼륨 내 서로 다른 부위에서 추출한 복수의 부분체적(sub-volume)에 대한 부피분율 산포 및 그에 따른 유효 물성 변동의 정량화와 확률론적 RVE 생성 기법의 도입을 통해 통계적 대표성을 확보하며, (iii) 제작 시편의 추가 기계적 물성 시험 결과와의 비교를 통해 모델의 정밀도를 검증하며, (iv) 열-기계 연성 해석과 산화·식각 환경에서의 거동 예측으로 프레임워크를 고도화할 예정이다. 또한 딥러닝 기반의 대리 모델(surrogate model)을 도입하여 멀티스케일 해석의 계산 비용을 획기적으로 줄이는 후속 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다. (RS-2025-25442714)

REFERENCES

1. Chung, I., and Cho, M., "Recent Studies on the Multiscale Analysis of Polymer Nanocomposites," *Multiscale Science and Engineering*, 2019, 1(3), pp. 167-195.
2. Zhang, X., Guo, L., Liu, H., Zhang, Y., Fu, Q., Yin, X., and Li, H., "Advanced anti-ablation C/C composites: structural design strategies and future perspective," *Materials Today*, 2024, 80, pp. 710-736.
3. Jin, X., Fan, X., Lu, C., and Wang, T., "Advances in oxidation and ablation resistance of high and ultra-high temperature ceramics modified or coated carbon/carbon composites," *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(1), pp. 1-28.
4. Didenko, A., and Astapov, A., "Advances in the carbon-ceramic composites oxidation and ablation resistance: A review," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2025, 8(1), pp. 87-126.
5. Yang, L., Xiao, X., Liu, L., Luo, J., Jiang, K., Han, X., Zhao, C., Zhang, J., and Wang, G., "Dynamic oxidation mechanism of carbon fiber reinforced SiC matrix composite in high-enthalpy and high-speed plasmas," *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, 11(2), pp. 365-377.
6. Peters, A.B., Zhang, D., Chen, S., Ott, C., Oses, C., Curtarolo, S., McCue, I., Pollock, T.M., and Eswarappa Premeela, S., "Materials design for hypersonics," *Nat Commun*, 2024, 15(1), pp. 3328.
7. Choi, J.B., Kim, S.-H., Kim, S., Han, I.-S., Bang, H.-J., Seong, Y.-H., and Lee, S., "Interlaminar Shear and Joint Strength Evaluation of C/SiC Composites for Application to Regeneratively Cooled Scramjet Combustors," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 216-223.
8. Lim, C.-H., Hong, D.-J., Jang, H., Kang, S.-H., Lee, S.-H., Ko, H.-S., Choi, W.-H., and Nam, Y.-W., "Damage Behavior of Oxide/Oxide Ceramic Composites with Self-protecting Oxide Layers for Improved Atomic Oxygen Resistance in VLEO Satellites," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 333-342.
9. Eo, S.B., Yun, S.J., Kim, W.S., and Moon, S.Y., "Enhanced High-Temperature Protection of Ultra-Light CF/SiC Hybrid Composites," *Composites Research*, 2025, 38(6), pp. 636-640.
10. Shim, J.-W., Seo, H.-J., Lee, G.-G., Kang, S.-H., Yoo, J.-G., Hwang, M.-J., Choi, K.-S., and Nam, Y.-W., "Electromagnetic Wave Attenuation Based on the Multi-scattering Mechanism for the 3D-Printed Corrugated-core Broadband Radar-absorbing Composite Structure," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 320-332.
11. Joo, M.-S., Noh, Y.-D., Shim, D., and Kwak, B.-S., "Effect of Pitch-Based Carbon Fiber Stitching Density on the Conduction Welding Performance of CF/PEEK Composites," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 188-196.
12. Jeong, J., and Goh, M., "Effect of CFRP Recycling Techniques on the Physical Properties of Recovered Carbon Fibers," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 208-215.
13. Ji, H., Kim, M., Seo, J., Lee, D., and Kwon, D.-J., "Investigation of Interfacial Property Changes According to the Use of Veils in Carbon Fiber Reinforced Composites Fabrication," *Composites Research*, 2026, 39(1), pp. 8-13.
14. Jang, H., Lim, C.-H., Lee, H.-J., So, K.-S., Choi, W.-G., and Nam, Y.-W., "Evaluation of In-situ Consolidation Process of CF/LMPAEK Thermoplastic Blanks and Mechanical Behavior Using Non-contact Induction Heating Welding," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 311-319.
15. Jang, W.C., Jeong, W.J., Shim, Y.J., Hwang, S.H., and Roh, H.D., "Assessment of Interfacial Reliability of Adhesive-Free CFRP Sandwich Structures under Mode-II-Dominated Flexural Loading," *Composites Research*, 2026, 39(1), pp. 53-59.
16. Kim, J. H., Ha, D., Choi, H., and Yun, G.J., "Multiscale fatigue life prediction model for CFRP laminates considering the mechanical degradation of its constituents and the local stress concentration of the matrix," *Composite Structures*, 2024, 349-350, 118519.
17. Kim, W., Kim, W., Lim, S.H., Lee, J., Park, J., and Kim, S.S., "Analysis of the Mechanical Properties of Triaxial Braided Composites Depending on its Patterns," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 248-251.
18. Ha, D., Kim, J.H., Kim, T., Joo, Y.S., and Yun, G.J., "Multiscale fatigue damage model for CFRP laminates considering the effect of progressive interface debonding," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 31(11), pp. 2321-2333.
19. Toray Composite Materials America, I., TORAYCA® Technical Manual, I. Toray Composite Materials America, Editor, 2020.
20. Yoo, W.-K., Baek, J.-H., Park, J.-W., and Kim, H.-S., "Prediction of the Warpage for Large-scale Semiconductor Package Using Equivalent Model Considering the Anisotropic Thermomechanical Properties Based on Multi-physics Simulation," *Composites Research*, 2026, 39(1), pp. 60-66.
21. Cho, S., and Cheon, S.S., "Prediction of Interlaminar Shear Stress in Laminated Composites using Hybrid PINN incorporated with Anisotropic Hertzian Contact Theory," *Composites Research*, 2026, 39(1), pp. 1-7.
22. Lim, S.H., Kim, W., Kim, W., Lee, J., and Kim, S.S., "Effect of Carbon Fiber Surface Chemistry on Resin Impregnation in VaRTM Process: A Molecular Dynamics Study," *Composites Research*, 2025, 38(3), pp. 252-256.
23. Gandomi, A.H., Yang, X.S., Talatahari, S., and Alavi, A.H., "Firefly algorithm with chaos," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2013, 18(1), pp. 89-98.
24. Cho, B.-G., "Study on Mold Temperature-Dependent Deformation and Impact Behavior of PPS/GF Composites using Digital Image Correlation," *Composites Research*, 2026, 39(1), pp. 14-20.