

멀티스케일 균질화 기법을 이용한 평직 탄소섬유 복합재의 강성 예측 연구

황승욱* · 김정*†

A Study on Stiffness Prediction of Plain Weave CFRP using Multiscale Homogenization Method

Seung-Wook Hwang*, Jeong Kim*†

ABSTRACT: This study numerically predicted the mechanical stiffness of plain weave CFRP by establishing a two-step multiscale homogenization technique based on Representative Volume Elements (RVE). To simulate the complex woven structure, a stepwise homogenization process was performed across micro and mesoscales. First, the anisotropic effective properties of the yarn, reflecting the interaction between T300 fiber and K51 resin, were derived. These were then applied to a mesoscale RVE model to calculate the final effective stiffness. To verify the framework, tensile tests were conducted per ASTM D3039. The experimental Young's modulus (68.3 GPa) and the FEA result (73.94 GPa) showed a relative error of approximately 8.25%. This difference is attributed to the infinite continuum assumption of periodic boundary conditions (PBC) and the exclusion of manufacturing defects. The established multiscale technique demonstrated excellent effectiveness in predicting the behavior of woven composites during the initial design phase.

초 록: 본 연구에서는 RVE(Representative Volume Element) 기반의 2단계 멀티스케일 균질화 기법을 정립하여 평직 탄소섬유 복합재료의 기계적 강성을 예측하였다. 미시적 구조를 모사하기 위해 해석 범위를 Micro-mesoscale로 구분하여 단계적 균질화 과정을 수행하였다. 먼저 1차 균질화를 통해 T300 탄소섬유와 K51 에폭시 수지 간의 상호작용이 반영된 섬유 다발(Yarn)의 이방성 유효 물성을 도출하였으며, 이를 평직 구조 모델에 적용하여 최종적인 유효 강성을 산출하였다. 제안된 프레임워크의 검증을 위해 ASTM D3039 표준 인장 시험을 수행한 결과, 실험값(68.3 GPa)과 해석값(73.94 GPa) 사이에서 약 8.25%의 오차를 확인하였다. 이는 주기적 경계 조건(PBC)에 따른 연속체 가정 및 실제 공정 결함의 배제에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 확립된 해석 기법은 복잡한 직조 구조 복합재의 초기 설계 단계에서 물성 예측 기술로서의 유효성을 입증하였다.

Key Words: 대표체적요소(RVE, Representative Volume Element), 멀티스케일 균질화(Multiscale Homogenization), 유한요소해석(Finite Element Analysis), 평직 탄소섬유 복합재(Plain Weave CFRP Composites)

1. 서 론

탄소섬유 강화 플라스틱은 우수한 비강도와 비강성, 뛰어난 내식성 및 내구성을 바탕으로 항공우주, 자동차, 등 고성능이 요구되는 다양한 산업 분야에서 핵심적인 구조 재

료로 사용되고 있다. 특히, 초기 복합재료 시장은 주로 단방향(Unidirectional, UD) 소재를 중심으로 성장하였으나, 최근에는 공정 편의성과 다방향 하중 지지 능력이 뛰어난 직조형(Woven) 복합재에 대한 수요가 급증하고 있다.

그러나 직조 복합재료는 단방향 소재에 비해 구조적으

로 매우 복잡한 기하학적 형상을 가진다. 경사(Warp)와 위사(Weft)가 서로 상하로 교차하며 엮인 구조는 면내 등방성에 가까운 우수한 물성을 제공하지만, 동시에 섬유 다발의 굴곡(Crimp)으로 인한 층간 분리(Delamination)나 응력 집중(Stress Concentration)과 같은 복잡한 파손 메커니즘을 유발한다. 따라서 직조 복합재료를 실제 구조물 설계에 안전하게 적용하기 위해서는 이러한 미시 구조적 특징이 거시적 기계적 거동에 미치는 영향을 정확히 예측하는 기술이 필수적이다.

전통적으로 복합재 물성 예측에는 적층 이론(Classical Lamination Theory, CLT)이나 대표 체적 요소(Representative Volume Element, RVE) 모델을 이용한 단일 스케일 유한요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)이 주로 사용되어 왔다. 하지만 이러한 단일 스케일 접근법은 직조 구조 내의 섬유, 수지, 그리고 섬유 다발 간의 상호작용을 충분히 반영하지 못하여 예측 정밀도가 낮다는 한계가 있다[10,11]. 반면, 모든 미시 구조를 반영한 단일 거대 FE 모델은 경계 조건 설정의 복잡성 및 과도한 계산 비용으로 인해 실제 설계 공정에 적용하기 어렵다는 한계가 존재한다[12-14].

이러한 한계를 극복하기 위해 멀티스케일 균질화 기법이 대두되었다. 기존 연구에서는 RVE 재구성 알고리즘을 통한 멀티스케일 모델링[1] 및 데이터 기반 균질화 기법[2], 미시 구조의 확률적 분포를 고려한 해석[3], 그리고 계층적 접근법을 이용한 직조 복합재 모델링[15,16] 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

본 연구는 이러한 기존 연구들의 한계를 극복하기 위해 효율적이며 신뢰성 있는 2단계 멀티스케일 균질화 해석 프레임워크를 정립하였다. 특히 LS-Dyna의 *RVE_ANALYSIS_FEM 키워드를 도입하여 주기적 경계 조건(PBC) 하의 수치적 효율성을 극대화하였으며, 6개의 독립적인 단위 변형률 인가 과정을 수치적으로 체계화하여 유효 강성 행렬 도출의 정밀도를 확보하였다. 이를 통해 도출된 섬유 다발(Yarn)의 이방성 물성을 2차 Mesoscale 모델에 계층적으로 적용함으로써, 계산 효율성을 유지하면서도 직조 복합재 특유의 기하학적 굴곡(Crimp)에 의한 거동을 효과적으로 모사하였다는 점에서 본 연구는 기존 연구들과 차별성을 가진다.

멀티스케일 균질화 기법은 복합재료를 구성하는 각 스케일(Microscale, Mesoscale, Macroscale)의 물성을 단계적으로 통합하여 최종적인 구조물의 물성을 도출하는 방식이다. Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 2단계 멀티스케일 균질화 해석 프레임워크를 나타낸 것이다. Microscale(섬유 + 수지)에서 도출한 유효 등가 물성(Effective Equivalent Properties)을 1차 균질화 과정을 통해 Mesoscale(섬유 다발 + 수지) RVE 모델에 입력 물성으로 부여하고, 다시 2차 균질화 과정을 거쳐 Macroscale에서의 최종적인 복합재 유효 강성(Effective Stiffness)을 산출한다. 이에 본 연구에서는 RVE 기반의 고정밀 멀티스케일 균질화 해석 기법을 수립하고,

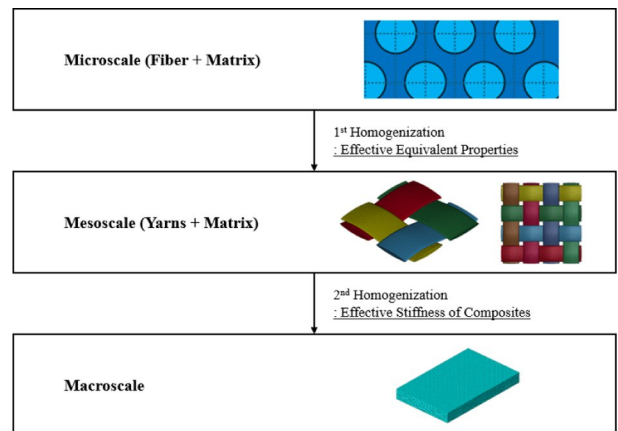


Fig. 1. Schematic of Multiscale Homogenization Process

이를 이용하여 평직(Plain Weave) 탄소섬유 복합재료의 기계적 강성을 예측하고자 한다.

2. 균질화 이론

2.1 멀티스케일 균질화 이론

직조 탄소섬유 복합재의 복잡한 기하학적 구조를 효과적으로 해석하기 위해 미시적 성질을 거시적 유효 성질로 변환하는 멀티스케일 균질화 기법(Multiscale Homogenization Method)을 적용한다. 이 과정의 핵심인 대표체적요소(Representative Volume Element, RVE)는 불균질한 복합재료를 통계적으로 대표할 수 있는 최소 단위 체적을 의미한다.

2.2 대표체적요소 이론

대표체적요소(RVE)는 불균질한 복합재료의 전체 구조를 통계적으로 대표할 수 있는 작은 단위의 체적을 의미한다. RVE 해석의 타당성은 미시적 에너지 밀도의 평균이 거시적 에너지 밀도와 일치해야 한다는 힐-만델(Hill-Mandel) 조건에 근거하며[5], 이를 통해 RVE를 하나의 균질한 이방성 체로 간주할 수 있다. 직조 복합재의 3차원 응력[8] 및 RVE로부터의 물성 예측[10,12]에 관한 이론적 토대는 선행 연구를 통해 정립되어 왔다.

본 연구에서 설정한 RVE는 균질화 이론의 타당성을 확보하기 위해 아래의 두 가지 핵심 가정을 충족하도록 모델링하였다.

첫 번째 가정은 주기성으로, RVE는 공간상에서 무한히 반복되어 전체 재료 구조를 형성한다고 가정하며, RVE가 전체 구조의 연속성을 유지하기 위해서는 마주보는 경계면에서의 변위 연속성이 보장되어야 한다. 이를 위해 주기적 경계 조건(Periodic Boundary Condition, PBC)을 적용하며, 이는 식 (1)과 같이 RVE 두 대향면 사이의 변위 차이가 거시적 평균 변형률에 의해 결정됨을 의미한다. 관련 이론은 여러 연구를 통해 그 타당성이 입증된 바 있다[6,14].

$$u_i(x^+) - u_i(x^-) = \bar{\varepsilon}_{ij}(x^+ - x^-) \quad (1)$$

두 번째 가정은 균질성으로, 미시적 관점에서는 섬유와 수지가 분리된 상태이지만, 거시적 관점에서는 RVE가 하나의 균질한 이방성 체로 거동한다고 간주한다. 이러한 미시역학 기반의 균질화 이론은 복합재료의 유효 물성 산출을 위한 주요 도구로 현재까지도 사용되어 오고 있다.

본 연구에서는 해석의 효율을 위해 두 단계의 RVE를 구성하였으며, 1차 균질화를 위해 섬유와 수지의 배열을 모사한 Microscale의 RVE를 생성하였고, 2차 균질화를 위해 섬유 다발의 직조 형태를 반영하여 섬유 다발과 수지를 통해 Mesoscale의 RVE 모델을 구축하였다.

2.3 균질화 기법: 평균 응력 및 변형률 이론

균질화 기법의 수치적 핵심은 RVE 내부에 발생하는 국부적이고 불균일한 미시적 관점의 응력(σ_{ij})과 변형률(ε_{ij})을 체적 평균하여 거시적 관점의 평균 응력($\bar{\sigma}_{ij}$)과 평균 변형률($\bar{\varepsilon}_{ij}$)로 정의하는 것이다. 체적 V 를 가진 RVE에 대하여 각 평균 물리량은 아래 식 (2), (3)과 같이 수식화할 수 있다.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}(x, y, z) dV \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}(x, y, z) dV \quad (3)$$

위와 같은 평균화 과정을 통해 정의된 거시적 물리량은 식 (4)과 같은 선형 탄성 구성 방정식을 만족한다.

$$\bar{\sigma}_{ij} = C \bar{\varepsilon}_{ij} \quad (4)$$

여기서 C 는 도출하고자 하는 복합재료의 유효 강성 행렬 (Effective Stiffness Matrix)이다. 이 유효 강성 성분을 산출하기 위해서는 각 자유도에 대해 독립적인 단위 변형률을 순차적으로 인가하고, 각 하중조건에서 얻어진 평균 응력값을 통해 강성 행렬의 각 성분을 정량적으로 도출할 수 있다[13,16]. 이러한 균질화 과정을 2단계 거침으로써 미시적인 섬유 및 수지의 특성으로부터 거시적인 직조 탄소섬유 복합재료의 강성까지 논리적으로 연결된 예측 프레임워크를 구축하였다.

3. 재료 구성식

3.1 직조 복합재료

직조 복합재의 거시적 유효 강성을 정확히 예측하기 위해서는, 각 스케일을 구성하는 내부 재료들의 기계적 거동을 수학적으로 명확히 정의하는 과정이 선행되어야 한다. 평직 탄소섬유 복합재는 등방성(Isotropic)을 띠는 기질 수지와 횡등방성(Transversely Isotropic)을 띠는 단일 탄소섬

유로 구성되며, 1차 균질화를 거쳐 도출된 섬유 다발은 직교 이방성(Orthotropic) 특성을 나타낸다. 즉, 각 구성 요소가 가지는 이방성의 수준이 다르므로, 이를 유한요소해석에 올바르게 적용하기 위해서는 독립 탄성 상수의 개수와 구성식의 형태가 다르게 적용되어야 한다.

따라서 본 절에서는 해석 모델에 적용된 각 재료 모델에 적용된 응력(σ)과 변형률(ε) 관계를 지배하는 일반화된 후크의 법칙(Generalized Hooke's Law)을 설명한다. 각 재료의 거동은 유연도 행렬(Compliance Matrix, S)을 통해 아래와 같이 정의되며, 앞서 식 (4)에서 정의한 거시적 유효 강성 행렬의 역행렬($C = S^{-1}$)과 동일한 물리적 의미를 갖는다.

3.2 등방성 재료

미시 구조의 방향성과 무관하게 모든 방향에서 물리적 성질이 동일한 등방성 재료는 총 2개의 독립 탄성 상수(영률 E , 푸아송비 ν)만으로 전체 거동이 정의된다. 전단 탄성 계수 G 는 $G = E/2(1 + \nu)$ 의 관계로 계산되며, 구성식은 아래 식 (5)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

3.3 횡등방성 재료

탄소섬유와 같이 길이 방향(1축)으로는 물성이 다르지만, 단면 평면(2-3 평면) 내에서는 등방성 거동을 보이는 재료이다. 2-3 평면의 대칭성 조건($E_{33} = E_{22}$, $G_{31} = G_{12}$)에 의해, 총 5개의 독립 탄성 상수(E_{11} , E_{22} , G_{12} , ν_{21} , ν_{32})를 갖는 아래 식 (6)으로 단순화된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{22} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{22} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

3.4 직교 이방성 재료

서로 직교하는 세 개의 주축(1, 2, 3 방향) 모두에서 기계적 특성이 다른 재료이다. 상호 종속되어 계산되는 값이 존재하지 않아 3개의 영률, 3개의 전단 계수, 3개의 푸아송비 등 총 9개의 독립 탄성 상수(E_{11} , E_{22} , E_{33} , G_{23} , G_{31} , G_{12} , ν_{21} , ν_{31} , ν_{32})를 가지며, 구성식은 아래 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{22} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_{33} & -\nu_{23}/E_{33} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

4. 실험

4.1 직조 복합재료

본 연구에서는 직조 탄소섬유 복합재료의 미시 구조에 따른 강성 변화를 예측하기 위해, 수치 해석 모델의 기초 자료가 되는 재료의 물리적 특성을 파악하고 멀티스케일 균질화 해석 결과의 타당성을 검증하기 위한 인장 실험을 수행하였다.

본 연구에 사용된 재료는 T300급 탄소섬유와 고인성 에폭시 수지인 K51이 함침된 평직 탄소섬유 복합재이다, 평직 구조는 경사와 위사가 일정한 간격으로 상하 교차하며 엮인 구조로, 면내 방향으로 균일한 기계적 특성을 나타내는 특징이 있다.

시편 제작을 위해 설계된 평직 탄소섬유 복합재를 오토 클레이브 (Autoclave) 성형 공정을 통해 경화시켰고, 승온 속도 2.5°C/min, 냉각 속도 3°C/min, 가압 속도 2 psi/min으로 경화하여 제작하였다. 경화 사이클은 Fig. 2와 같다.

시편은 총 12층 적층하여 제작하였으며, ASTM D3039 규격에 맞게 워터젯 가공을 통해 시편을 커팅하였으며 시험 중 그립 부분에서의 조기 파손을 방지하고 응력 집중을 완화하기 위하여 시편 양단에 GFRP 탭을 붙여 제작하였다.

4.2 인장 시험

제작된 평직 복합재료의 거시적 기계적 거동을 확인하고 멀티스케일 균질화 해석 결과와 비교하기 위해 복합재료의 대표적인 인장 시험 표준인 ASTM D3039에 의거하여 수행되었다.

시편의 치수는 250mm × 25mm × 2.5mm이며, 시험은

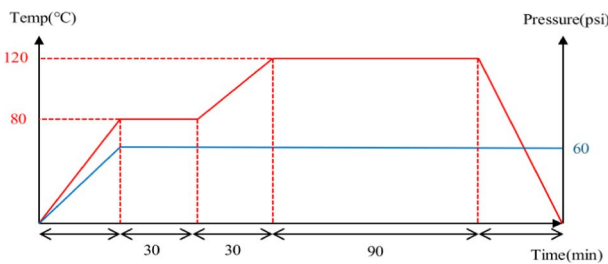


Fig. 2. Curing Cycle

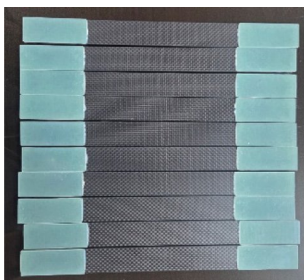


Fig. 3. Plain Weave CFRP Specimens

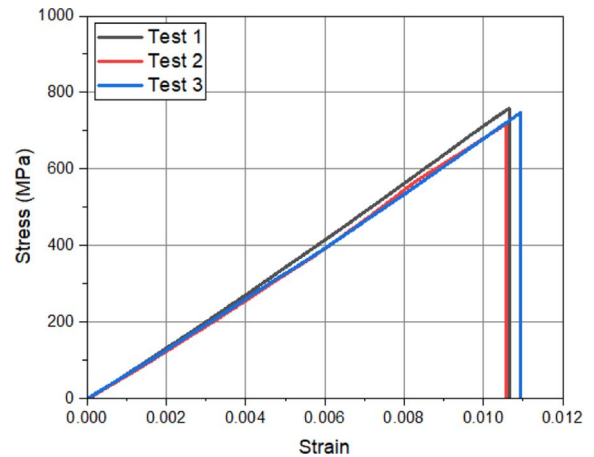


Fig. 4. S-S Curves (Experiments)

Table 1. Plain Weave CFRP Material Property

Material Property (Unit)	Value
Young's Modulus (GPa)	68.3
Strain	0.0106
Tensile Strength (MPa)	758

MTS 10T 장비를 이용하여 2mm/min의 인장 속도로 시편을 인장시켰다. 또한, 시편에 Extensometer를 장착하여 변형률을 정밀하게 측정하였다.

실험을 통해 획득한 하중-변위 선도는 Fig. 4와 같으며 실험을 통해 탄성 계수, 파단 변형률, 인장 강도를 확인할 수 있으며 도출한 평직 탄소섬유 복합재료의 물성은 Table 1과 같다.

5. 유한요소모델

5.1 RVE 모델링

본 연구에서는 직조 복합재 전용 상용 전처리 프로그램인 TexGen[9,15]과 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-Dyna를 이용하여 멀티스케일 균질화 해석을 위한 RVE 모델을 생성하였다.

먼저 첫 번째 균질화 과정을 통해 섬유 다발(Yarn)의 등가 물성을 도출하기 위해 섬유와 수지의 상호작용을 묘사하는 Microscale RVE 모델을 생성하였다. 섬유 다발의 경우 T300 탄소 섬유의 직경인 7μm를 기준으로 모델링하였다. 섬유 다발 내부에서 탄소 섬유가 규칙적으로 배열된 상태를 묘사하기 위하여 흔히 가정으로 쓰이는 육방배열(Hexagonal array) 기반의 RVE 모델을 구축하였으며, 이 모델은 크게 강화재인 탄소 섬유와 이를 지지하는 수지로 구성된다.

본 연구에서는 앞서 3절에서 정리한 재료 구성식을 기반으로 각 스케일의 유한요소모델을 구축하였다. 1차 균질화

과정(Microscale)에서 기질 역할을 하는 K51 수지는 식 (5)의 등방성 구성식을 따르도록 LS-Dyna 내의 *MAT_ELASTIC 키워드를 통해 물성을 부여하였다. 반면 T300 탄소섬유는 식 (6)에 명시된 5개의 독립 탄성 상수를 갖는 횡 등방성 거동을 모사하기 위해 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC 키워드를 사용하였으며, 재료의 주축 방향을 섬유 길이 방향과 일치시켜 입력하였다. 또한, 2-3평면 대칭성 조건을 위해 $E_{33} = E_{22}$, $G_{31} = G_{12}$ 조건으로 직교 이방성을 나타내는 키워드를 횡등방성 재료로 거동하도록 입력하였다.

추가로 유한요소 모델 구성 시, 1차 모델의 섬유-수지 및 2차 모델의 섬유 다발-수지 계면은 박리나 미끄러짐이 없는 완벽한 결합(Perfect bonding) 상태로 가정하여 절점 공유(Node Sharing) 방식으로 구현하였다.

이러한 1차 해석으로부터 도출된 체적 평균 응력(Volume-averaged stress) 데이터를 기반으로 6×6 유효 강성 행렬을 구성하였으며, 이를 통해 직조 섬유 다발(Yarn)의 9개 독립 탄성 상수(Table 5)를 추출하였다.

이어지는 2차 균질화 과정(Mesoscale)에서는 직조 탄소 섬유 복합재의 유효 강성을 도출하기 위해 섬유 다발이 평직 구조로 직조되어 있는 형상을 반영하였다. 이때 직조 구조 내부의 섬유 다발은 굴곡(Crimp) 형상을 가지므로 전역 좌표계를 동일하게 적용할 수 없다. 따라서 TexGen 프로그램을 통해 평직 구조로 직조된 형상을 반영하고 굴곡의 경우 Bezier Spline을 가정하여 굴곡을 따라 Yarn 내부의 각 유한요소마다 독립적인 요소 국부 좌표계(Element Local Coordinate System)를 설정하였다. 이를 통해 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC 재료 모델의 1 방향이 실제 굴곡 궤적을 연속적으로 추종하며 식 (7)의 직교 이방성 구성식을 따르도록 해석 모델에 적용하였다.

모델에 대한 자세한 정보는 Table 2와 같으며 최종 모델

Table 2. Mesoscale RVE Model Geometry

Yarn Spacing	Yarn Width	Yarn Height	Crimp Angle
2.02mm	1.82mm	0.11mm	3.84°

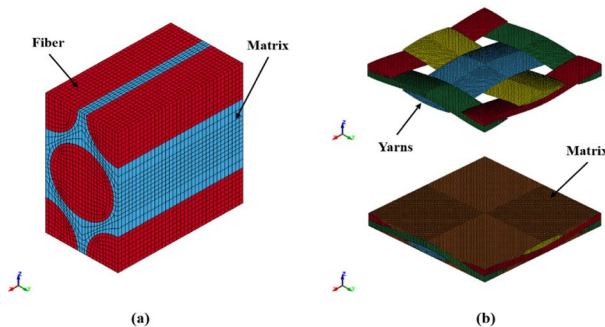


Fig. 5. RVE-Based FE Model for each Homogenization (a) Microscale, (b) Mesoscale

링한 형상은 Fig. 5와 같다.

5.2 1차 균질화 해석

생성한 2가지 RVE 모델을 통해 2번의 단계를 거쳐 최종 직조 탄소섬유 복합재의 유효 강성을 예측할 수 있다. 균질화 과정은 순차적으로 이루어져야 하기 때문에 먼저 섬유 다발의 유효 등가 물성을 예측하기 위한 균질화가 먼저 수행되어야 한다.

첫 번째 균질화 과정은 Fig. 1의 RVE 모델을 사용하며 최종적으로 유효 등가 물성 즉, 유효 등가 행렬을 구해야 하는 것이 주 목적이다. 이에 x, y, z 방향으로의 독립적인 인장($\epsilon_x \neq 0$, $\epsilon_y \neq 0$, $\epsilon_z \neq 0$), xy, yz, zx 방향으로의 독립적인 전단($\gamma_{xy} \neq 0$, $\gamma_{yz} \neq 0$, $\gamma_{zx} \neq 0$) 총 6번의 해석을 진행하였다.

RVE 모델을 이용한 균질화 해석을 진행하기 위해 LS-Dyna의 *RVE_ANALYSIS_FEM 키워드를 이용하여 독립적인 단위 변형률을 설정하였고, 주기적 경계 조건(PBC)을 적용하였다. 1차 해석에 사용된 섬유와 수지의 물성은 Table 3, 4과 같다.

각 해석 단계에서 도출된 내부 응력 분포는 앞서 언급한 체적 평균화 수식에 대입되며 이를 통해 거시적 평균 응력을 계산하고 얻어지는 평균 응력 성분들은 강성 행렬의 요소들을 결정한다. 이와 같이 총 6번의 방향별 해석을 통해 반복하며 최종적으로 섬유 다발의 9개 독립 탄성 상수를 포함하는 직교 이방성 강성 행렬을 획득하였다. 각 자유도에 대한 6번의 다른 해석 결과는 Fig. 6을 참고할 수 있으며 해석을 통해 도출된 결과에 따르면 섬유 방향 강성인 E_{11} 은 164.08 GPa로 산출되었으며, 이는 탄소섬유의 높은 강성이 지배적으로 반영된 결과이다. 반면 횡방향 강성인 E_{22} 과 E_{33} 은 수지의 영향을 크게 받아 약 11.17 GPa로 산출되었다. 획득한 강성 행렬의 요소들을 정리하여 섬유 다발의 물성을 계산하고 정리한 결과는 Table 5와 같으며, 위 과정을 통해 얻어진 섬유 다발의 유효 등가 물성치를 2차 균질화 해석

Table 3. Matrix Material Property

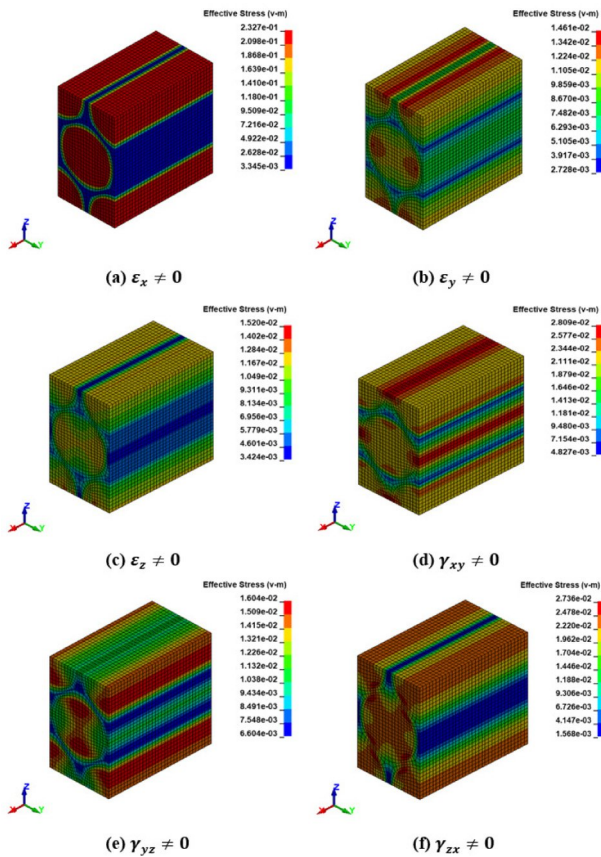
Material Property (Unit)	Value
E (GPa)	3.45
ν	0.35

Table 4. Fiber Material Property

Material Property (Unit)	Value
E_{11} (GPa)	230
E_{22} (GPa)	15
G_{12} (GPa)	15
G_{23} (GPa)	7
ν_{21}	0.013
ν_{23}	0.4170

Table 5. Yarn's Effective Equivalent Properties

Material Property (Unit)	Value
E_{11} (GPa)	164.08
E_{22} (GPa)	11.17
E_{33} (GPa)	11.17
G_{12} (GPa)	4.63
G_{23} (GPa)	3.24
G_{31} (GPa)	4.63
ν_{21}	0.0144
ν_{31}	0.0144
ν_{23}	0.4170

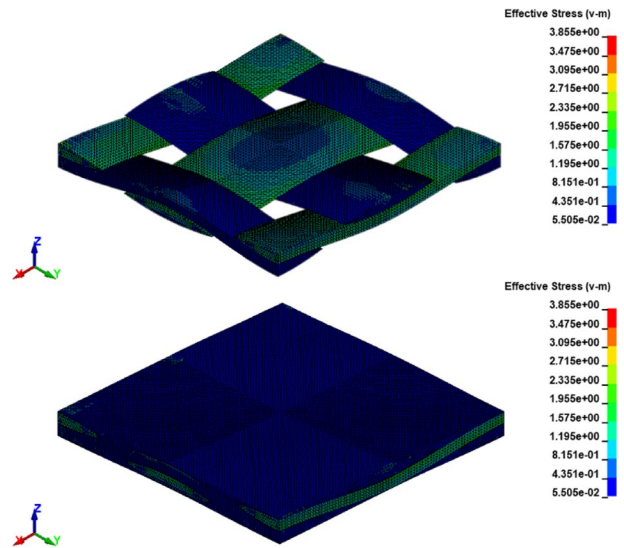
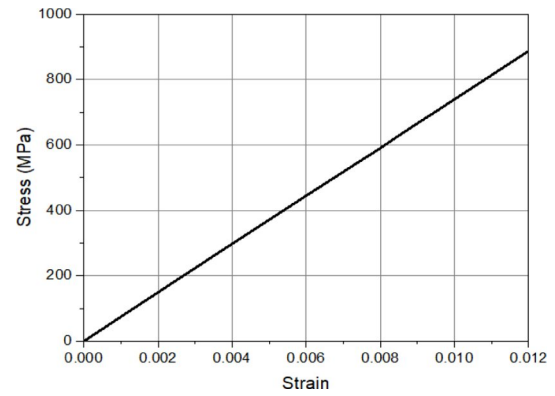
**Fig. 6.** 1st Homogenization FEA Results (a) x-tensile, (b) y-tensile, (c) z-tensile, (d) xy-shear, (e) yz-shear, (f) zx-shear

의 입력값으로 적용하여 2차 균질화 해석을 수행하게 된다.

5.3 2차 균질화 해석

두 번째 균질화 과정인 Mesoscale 해석은 1차 균질화 과정을 통해 도출한 섬유 다발의 이방성 유효 등가 물성을 실제 평직 구조를 가정한 RVE 모델에 적용하여 최종적인 탄소섬유 복합재의 강성을 예측하는 과정이다.

1차 균질화 해석 과정과 동일하게 LS-Dyna의 *RVE_ANALYSIS_FEM 키워드를 이용하여 x 방향 인장의 독립적

**Fig. 7.** 2nd Homogenization FEA Results**Fig. 8.** S-S Curve (FEA Result)

인 단위 변형률을 설정하였고, 주기적 경계 조건(PBC)를 적용하여 물리적 연속성을 부여하고 해석을 수행하였다.

최종 멀티스케일 균질화를 통해 획득한 평직 탄소섬유 복합재의 유효 강성은 73.94 GPa로 산출되었다.

해석 결과는 Fig. 7을 참고할 수 있으며, 도출된 해석 결과를 바탕으로 응력-변형률 선도를 나타내면 Fig. 8와 같다.

6. 결과 비교

본 연구에서 수행한 실험 결과와 멀티스케일 균질화 해석을 통해 도출된 유효 강성을 비교 분석하였다. 실험을 통해 획득한 평직 탄소섬유 복합재의 영률(E_{11})은 68.3 GPa로 나타났으며, 멀티스케일 균질화 유한요소 해석을 통해 예측된 유효 강성(E_{eff})은 73.94 GPa로 확인되었다.

두 결과 사이의 상대오차는 약 8.25%로 나타났으며, 이는 수치해석 모델이 실제 복합재료의 강성 거동을 적절히 묘사하고 있음을 의미한다.

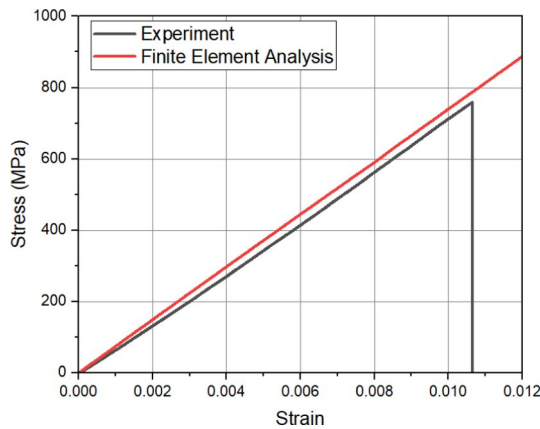


Fig. 9. Comparison of S-S Curves

해석 결과가 실험값보다 다소 높게 산출된 주요 원인은 주기적 경계 조건(PBC)의 영향으로 판단된다. 주기적 경계 조건은 앞서 언급했듯 RVE 구조가 무한히 연속된다고 가정하므로, 시편의 Free Edge 효과나 실험 시 발생하는 편심 하중 등의 외부 요인이 배제되기 때문에 실제 12층 적층한 시편의 인장 시험 결과와 비교했을 때, 비교적 높은 강성을 나타낸다고 판단된다.

또한, 실제 복합재 내부에는 오토클레이브 공정과 같은 고온 고압의 경화 조건을 적용하여 제작하였더라도 미세 기공(Void)이나 섬유와 기재 사이의 불완전한 계면 결합이 존재할 수 있다. 하지만 본 연구에서 사용한 해석 모델에서는 완벽한 결합을 가정하여 해석을 진행하였기 때문에 강성이 높게 예측된 것으로 판단된다.

추가적으로, 해석 결과 도출된 응력-변형률 선도(Fig. 8)를 살펴보면 완전한 선형 거동이 아닌, 변형률이 증가함에 따라 기울기가 점진적으로 감소하는 미세한 비선형적 응답을 보여준다. 본 해석에서 이러한 현상이 관찰되는 것은 재료의 비선형성이 아닌 수치적 정식화에 기인한다. LS-Dyna의 대변형 이론 하에서 인장 변형에 따른 횡단면적 수축이 반영되며, 이를 초기 단면적 기준의 공칭 응력-공칭 변형률(Engineering stress-strain)로 후처리하는 과정에 나타나는 기하학적 현상으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 RVE 기반의 멀티스케일 균질화 기법을 이용하여 평직 탄소섬유 복합재료의 기계적 강성을 예측하고, 이를 실험 결과와 비교하여 2 단계의 멀티스케일 균질화 해석 프레임워크의 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 실험적 검증을 위해 ASTM D3039 표준에 의거하여 평직 탄소섬유 복합재의 인장 시험을 수행하였다. 그 결과, 대상 소재의 거시적 물성인 영률 68.3 GPa, 강도 758 MPa,

그리고 파단 변형률 0.0106을 측정하여 해석 결과와 비교하기 위한 기준 데이터를 확보하였다.

둘째, 2단계 멀티스케일 해석을 수행한 결과, 1차 균질화 과정을 통해 섬유와 수지 사이의 미시적 상호작용이 반영된 섬유 다발(Yarn)의 유효 등가 물성을 성공적으로 도출하였다. 이어지는 2차 균질화 해석에서는 이를 평직 구조 RVE에 적용하여 최종적으로 약 73.94 GPa의 유효 강성을 산출하였다.

셋째, 해석 모델의 타당성을 분석한 결과, 실험값과 해석값 사이의 상대 오차는 약 8.25%로 나타났다. 실제 시편은 12층의 적층 구조를 가지는 반면, RVE 해석은 주기적 경계 조건(PBC)을 통해 무한 연속체를 가정한다는 기하학적 차이가 존재함에도 불구하고 공학적으로 유의미한 예측 정밀도를 확인하였다. 이는 본 연구에서 제안한 2단계 균질화 과정이 복합재료 설계 초기 단계에서 물성을 예측하는 효율적인 도구가 될 수 있음을 의미한다.

결론적으로, 본 연구에서 확립한 RVE 기반 유효요소 해석을 활용한 멀티스케일 균질화 기법은 복잡한 직조 구조를 가진 복합재료의 강성 거동을 수치적으로 모사하는 데 탁월한 유효성을 보였다.

향후 연구에서는 1방향 영률뿐만 아니라 압축, 전단 등의 추가 실험 및 균질화 해석 과정을 거치며 실제 공정상 발생하는 미세 결함 등을 추가로 고려하고 본 멀티스케일 균질화 해석 과정의 정밀도를 더욱 향상시킬 예정이다. 특히, 본 연구에서 제안한 모델링의 범용성과 유효성을 더욱 확고히 하기 위해, 특정 각도에 국한되지 않는 다양한 축 방향의 인장 실험을 추가로 수행하고 복잡한 전단 거동 및 다축 하중 조건에서의 해석 결과를 상세히 비교 검증하는 연구를 최우선 과제를 진행할 계획이다.

후 기

이 연구는 우주항공청의 재원(RS-2022-NR067081)으로 지원을 받아 수행되었으며, 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국 21 사업 (4 단계 BK21 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자분들께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lim, H.J., Choi, H.I., Yoon, S.J., Lim, S.W., Choi, C.H., and Yun, G.J., "Development of RVE Reconstruction Algorithm for SMC Multiscale Modeling," *Composites Research*, Vol. 34, No. 1, 2021, pp. 70-75.
2. Han, K.S., Lee, W.J., and Shin, H.S., "A Data-driven Multiscale Analysis for Hyperelastic Composite Materials Based on the Mean-field Homogenization Method," *Composites Research*, Vol. 36, No. 5, 2023, pp. 329-334.
3. Suk, J.K., Kim, T.R., Kim, J.H., and Yun, G.J., "Multi-scale Process-

- structural Analysis Considering the Stochastic Distribution of Material Properties in the Microstructure,” *Composites Research*, Vol. 35, No. 3, 2022, pp. 188-195.
4. Ha, D.W., Kim, J.H., Kim, T.R., Joo, Y.S., and Yun, G.J., “Multi-scale Progressive Fatigue Damage Model for Unidirectional Laminates with the Effect of Interfacial Debonding,” *Composites Research*, Vol. 36, No. 1, 2023, pp. 16-24.
 5. Hill, R., “Elastic Properties of Reinforced Solids: Some Theoretical Principles,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 11, No. 5, 1963, pp. 357-372.
 6. Xia, Z., Zhou, C., Yong, Q., and Wang, X., “On Selection of Repeated Unit Cell Model and Application of Periodic Boundary Conditions in Composite Materials,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 2, 2006, pp. 266-278.
 7. Cox, B.N., and Flanagan, G., *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*, NASA CR-4750, 1997.
 8. Whitcomb, J.D., “Three-Dimensional Stress Analysis of Plain Weave Composites,” *Composite Materials: Fatigue and Fracture (Third Volume)*, ASTM STP 1110, 1991, pp. 417-438.
 9. Boisse, P., Ed., *Composite Reinforcements for Optimum Performance*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2020.
 10. Sun, C.T., and Vaidya, R.S., “Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element,” *Composites Science and Technology*, Vol. 56, No. 2, 1996, pp. 171-179.
 11. Barbero, E.J., Trovillion, J., Mayugo, J.A., and Sikkil, E.K., “Finite Element Modeling of Plain Weave Fabrics from Photomicrograph Measurements,” *Composite Structures*, Vol. 73, No. 1, 2006, pp. 41-52.
 12. Suquet, P., *Continuum Micromechanics*, Springer-Verlag, New York, USA, 1997.
 13. Christensen, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1979.
 14. Aboudi, J., *Mechanics of Composite Materials: A Unified Micromechanical Approach*, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 1991.
 15. Verpoest, I., and Lomov, S.V., “Virtual Textile Composites Software TexGen and WiseTex: Tools for Prediction of Mechanical Properties and Micro-structural Damage,” *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 15, 2005, pp. 2563-2574.
 16. Dhimole, V.K., Chen, Y., and Cho, C., “Modeling and Two-step Homogenization of Aperiodic Heterogenous 3D Four-directional Braided Composites,” *Journal of Composites Science*, Vol. 4, No. 4, 2020, pp. 179.