



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(9), 663-670(2020)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.9.663

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

2.5D C_f/SiC_m 복합재의 기계적 물성 시험과 탄소성 모델링을 통한 유한요소해석이민정¹, 김연태², 이연관³Finite Element Analysis Through Mechanical Property Test and Elasto-plastic Modeling of 2.5D C_f/SiC_m Composite AnalysisMinJung Lee¹, Yeontae Kim² and YeonGwan Lee³The 1st R&D Institute-2, Agency for Defense Development^{1,3}The 4th R&D Institute-4, Agency for Defense Development²

ABSTRACT

A study on mechanical property characterization and modeling technique was carried out to approximate the behaviour of structures with 2.5D C/SiC material. Several tensile tests were performed to analyze the behaviour characteristics of the 2.5D C/SiC material and elastic property was characterized by applying a mathematical homogenization and a modified rule of mixture. SiC matrix representing the elasto-plastic behavior approximates as a bilinear function. Then the equivalent yield strength and equivalent plastic stiffness were calculated by minimizing errors in experiment and approximation. RVE(Representative Volume Element) was defined from the fiber and matrix configuration of 2.5D C/SiC and a process of calculating the effective stiffness matrix by applying the modified rule of mixture to RVE was implemented in the ABAQUS User-defined subroutine. Finite element analysis was performed by applying the mechanical properties of fiber and matrix calculated based on the proposed process, and the results were in good agreement with the experimental results.

초 록

2.5D C/SiC를 적용한 구조물의 거동 특성을 유한요소해석으로 근사하기 위해 기계적 물성 특성화와 모델링 기법에 관한 연구를 수행하였다. 2.5D C/SiC 소재의 거동 특성을 분석하기 위해 인장 시험을 수행하였고 수학적 균질화 기법과 수정된 혼합 법칙을 적용하여 2.5D C/SiC를 구성하는 섬유와 기지의 탄소성 물성을 정의하였다. 탄소성 거동을 나타내는 기지는 소성 영역의 거동을 bilinear 함수로 근사하고 시험과 해석의 오차를 최소화하여 등가 항복 강도와 등가 소성 강성을 계산하였다. 그리고 2.5D C/SiC의 RVE를 정의하고 수정된 혼합 법칙을 적용하여 유효강성행렬을 계산하는 과정을 ABAQUS의 User-defined subroutine을 통해 구성하였다. 제안된 과정을 바탕으로 정의된 섬유와 기지의 기계적 물성을 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과는 시험의 거동을 잘 근사하고 있음을 확인하였다.

Key Words : Mechanical Property Test(기계적 물성 시험), Mathematical Homogenization(수학적 균질화), Modified Rule of Mixture(수정된 혼합 법칙), Elasto-Plastic Behaviour(탄소성 거동), Effective Stiffness Matrix(유효강성행렬), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

† Received : June 9, 2020 Revised : August 13, 2020 Accepted : August 25, 2020

^{1,2,3} Researcher

³ Corresponding author, E-mail : yeongwan@add.re.kr

© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

I. 서 론

C/SiC 복합재는 1,500°C 이상의 초고온에서도 높은 비강도를 보이며 내산화성이 우수하여 우주 항공 분야에서 연소실의 노즐목, 구조물의 열방어 시스템, 날개의 선단 등에 적용 소재로 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. C/SiC 복합재는 탄소로 프리폼을 구성하고 SiC를 프리폼 내부에 함침하여 제작되고 탄소 프리폼의 기하학적 구조에 따라 2D, 2.5D 등의 형태로 나타낸다. SiC를 함침하는 방법은 CVI(Chemical Vapor Infiltration), PIP(Polymer Infiltration Pyrolysis), LSI(Liquid Silicon Infiltration) 등의 공법이 있으며 탄소 섬유 종류, 섬유의 부피 분율과 함침 시키는 방법 등에 따라 기계적/열적 물성이 달라질 수 있다[3]. 해외에서는 C/SiC 소재를 열방어 시스템에 적용하여 비행체에 적용한 연구들이 활발하게 진행되어 왔으나 국내는 C/SiC 소재를 개발하여 최근 구조물에 적용하고자 하는 연구들이 진행되고 있다.

구조물을 설계하고 구조 안전성을 예측하기 위해서는 소재의 기계적/열적 물성과 파손 특성을 파악하는 것이 중요하다. Zhen Chen은 3D needled C/C-SiC 복합재에 대해 다양한 온도 범위에서 기계적 물성시험을 수행하였으며[4], Xie는 3D 니들링 C/C-SiC의 수직방향 섬유가 기계적 물성에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다[5]. Kaiser는 LSI로 제작된 C/SiC 소재에 대해 기계적 물성 시험을 수행하고 파손 특성을 분석하였다[6]. Lim은 2.5D C/SiC를 탄소성 손상 모델로 근사하고 역해석을 통해 시험 결과를 근사하는 물성 모델링을 수행하였다[7]. 그러나 C/SiC 복합재는 소재를 제작하는 방법에 따라 기계적/열적 물성이 다르기 때문에 제작된 소재의 열적/기계적 물성을 시험적으로 구하는 것이 필요하다. 또한 PMC(Polymer Matrix Composite)와는 다르게 각 방향의 물성을 획득하기 위한 시편을 제작하는 것이 용이하지 않아 대부분의 경우 정해진 프리폼 구조에 대해 인장, 압축, 굽힘 강도와 열 물성 시험을 수행하여 소재의 물성을 평가 하고 있다. 인장, 압축, 전단, 굽힘 등 다양한 하중 조건에 대해서 구조물을 설계하고 구조 안전성을 예측하기 위해서는 소재의 강도와 강성이 모두 중요한 인자이며 소재를 구성하는 섬유와 기지의 기계적 물성과 해석 기법에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 2.5D C/SiC 소재에 대한 기계적 물성 시험을 수행하였다. 2D로 적층된 탄소 섬유(UD)에 대해 니들 펀칭을 수행하여 층간 결속력이 강화된 프리폼을 제작하였고 CVI와 PIP 공법을 적용하여 SiC를 함침하였다. 제작된 소재 블록을 기계가공을 통해 시편으로 제작하였고 인장 시험과 굽힘 시험을 수행하여 거동 특성을 분석하였다. 그리고 시험 결과를 바탕으로 수학적 균질화기법과 수정된 혼합 법칙

을 적용하여 섬유와 기지의 물성 특성화를 수행하였다. 2.5D C/SiC 소재의 기지는 약한 탄소성 특성을 나타내고 있으며 소성 영역의 거동을 bilinear 함수로 근사하였다. 그리고 등가 항복 응력과 소성 영역의 등가 소성 강성을 미지수로 놓고 시험과 근사값을 최소화하는 최소자승법을 사용하여 정의하였다. 2.5D C/SiC의 프리폼 구성으로부터 소재의 RVE를 정의하고 RVE를 구성하는 섬유와 기지에 대해 수정된 혼합법칙을 적용하여 유효강성행렬을 계산하고 상용 프로그램인 ABAQUS의 User-defined subroutine을 통해 구현하였다. 제안된 과정을 통해 얻어진 섬유와 기지의 물성을 적용하여 유한요소해석을 수행하고 최종적으로 해석 결과와 시험 결과를 비교하여 본 연구의 물성 특성화 과정과 해석 기법의 타당성을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 2.5D C/SiC 소재의 구성

2.5D C/SiC는 장섬유와 웹(랜덤하게 배열된 단섬유로 구성된 부직포)을 $[0^\circ/\text{Web}/90^\circ/\text{Web}]_T$ 로 적층하여 프리폼을 구성하고 수직 방향으로 니들 펀칭하여 웹의 단섬유를 수직방향으로 세워 층간의 결속력을 부가한다[8]. 그리고 CVI와 PIP 공법을 사용하여 프리폼 내부를 SiC로 채워 소재를 제작한다. 장섬유는 T-700급 소재를 적용하였다. Fig. 1은 두께가 5.0mm인 2.5D C/SiC의 CT 촬영 단면 사진을 나타낸 것이다. 0° 와 90° 방향으로 적층된 장섬유층 사이에 웹층이 있고 니들 펀칭에 의해 수직방향으로 세워진 섬유와 SiC 기지를 확인할 수 있다.

2.5D C/SiC의 섬유분율은 35%이고 이 중 웹 층의 섬유분율은 20%이다. 두께 5.0mm의 소재에 대해 4층의 장섬유층과 5층의 웹 층이 있으며 각 층의 두께를 고려할 때 장섬유층과 웹층의 부피 비율은 각각 50% 수준임을 확인할 수 있다. 따라서 장섬유층

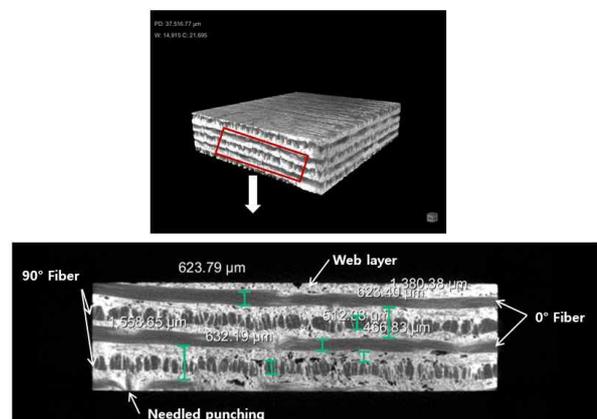


Fig. 1. CT image of the 2.5D C/SiC

은 섬유 분율의 부피분율이 56%이고 SiC 기지 분율이 44%로 구성된다. 웹층은 14%가 단섬유이고 SiC 기지층이 86%로 구성된다. 2.5D C/SiC 소재의 구성으로부터 웹 층은 SiC 기지 특성이 지배적인 영역이고 섬유층은 장섬유와 SiC 기지의 부피분율에 의해 특성이 나타날 것을 추정할 수 있다.

2.2 2.5D C/SiC의 기계적 물성 시험

2.2.1 0° 인장 시험

인장 시편은 환봉 형태로 Fig. 2와 같다. 시편의 치수는 시편의 길이와 그림부 직경에 대해 각각 정규화하여 나타낸 것이다. 섬유 방향은 시편의 길이 방향을 0°로 정의할 때 0°와 90°로 적층되어 있다. 총 4개의 시편에 대해 시험을 수행하였고 2개의 시편에 대해 gage length 내에서 파손이 발생한 시험 결과를 획득할 수 있었다. 2개의 시편에 대한 하중-변위 선도는 Fig. 3과 같고 각 시편별 강성과 강도는 Table 1과 같다. 2개 시편의 하중-변위 선도의 기울기와 파손하중 모두 편차가 커서 물성화 특성 과정에서는 평균값을 적용하였다.

2.2.2 ±45° 인장-전단 시험

±45° 인장-전단 시험의 시편 형상은 Fig. 2와 동일하며 섬유의 방향은 시편의 길이 방향에 대해 ±45° 회전되어 있다. 총 3개의 시편에 대해 시험을 수행하였으며 하중-변위 선도는 Fig. 4와 같고 각 시편별 강성과 강도는 Table 2와 같다. 기지의 특성이 많이 반영되는 ±45° 인장-전단 시험의 경우 탄소성 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

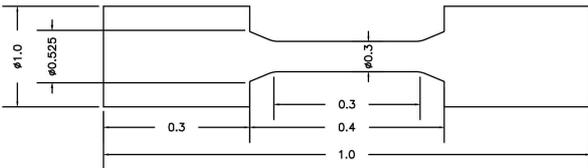


Fig. 2. Tensile Test Specimen Geometry

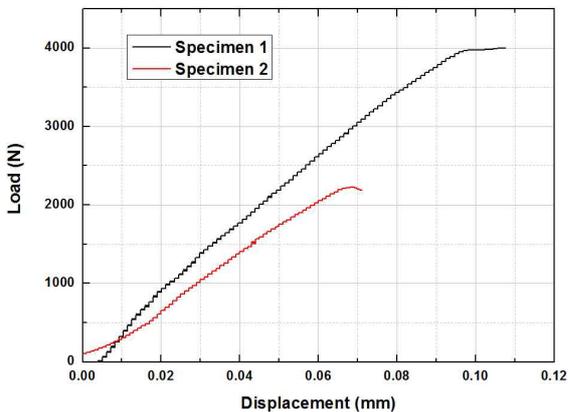


Fig. 3. Load-Displacement Curve of 0° Tensile test

Table 1. Results of the 0° Tensile-Shear test

| Specimen | Modulus (GPa) | Strength (MPa) |
|----------|---------------|----------------|
| 1 | 60.6 | 140.1 |
| 2 | 51.2 | 76.3 |
| Average | 55.9 | 108.2 |

Table 2. Results of the ±45° Tensile-Shear test

| Specimen | Modulus (GPa) | Strength (MPa) |
|----------|---------------|----------------|
| 1 | 48.8 | 65.5 |
| 2 | 26.4 | 50.0 |
| 3 | 24.5 | 59.6 |
| Average | 33.2 | 58.4 |

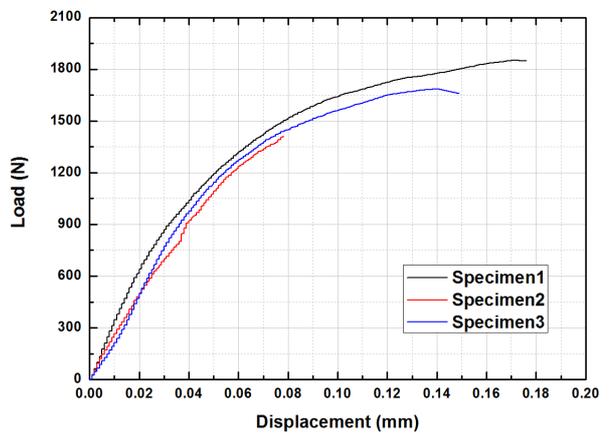


Fig. 4. Load-Displacement Curve of ±45° Tensile-Shear test

2.2.3 3점 굽힘 시험

3점 굽힘 시험은 섬유 방향에 대해 Fig. 5와 같은 형태로 총 5개의 시편에 대해 시험을 수행하였다. 시험편의 지지점 사이 거리는 30.0mm이다.

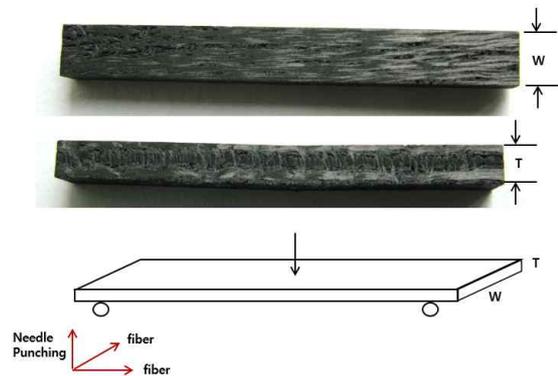


Fig. 5. 3 Point Bending Test Specimen

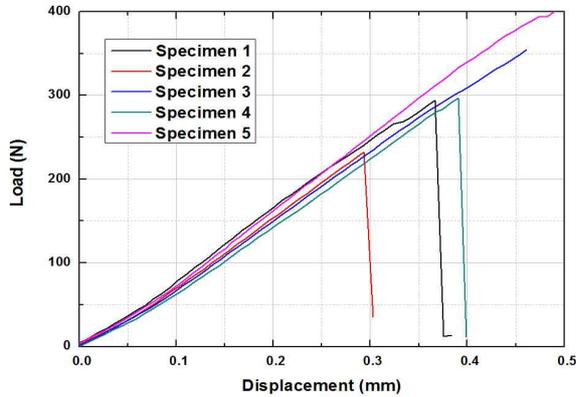


Fig. 6. Load-Displacement Curve of 3 Point Bending test

Figure 6은 3점 굽힘 시험에 대한 하중-변위 선도이다. 굽힘 하중에 대해 하중-변위 선도가 선형적으로 나타나고 있으나 파손 하중의 편차가 크게 나타나고 있다. 0° 방향의 인장시험과 3점 굽힘 시험과 같이 섬유 방향으로 인장력이 작용하는 경우에는 섬유의 특성이 나타나서 선형/탄성 거동을 보이고 있으나 $\pm 45^\circ$ 방향의 인장-전단 시험과 같이 기지의 특성이 나타나는 시험은 탄소성 거동이 나타나고 있다.

2.5D C/SiC는 소재 제작 특성상 니들 펀칭을 수행하는 과정에서 섬유에 손상이 발생할 수 있고 큰 블록을 제작한 후 기계가공을 통해 시험편을 제작하므로 블록 단위의 섬유분율과 기계가공 후 시험편 단위의 섬유분율에 차이가 발생할 수 있다. 또한 밀도화 과정에서 고온, 고압의 환경에 노출되면서 섬유가 휘는 현상 등이 관찰되어 기계 가공 후 최외각 섬유층이 하나의 층으로 일정하게 나타나지 않았다. 이러한 조건들로 인해 시험편의 물성 시험 결과는 산포가 심하고 안정적인 시험 결과를 얻기 쉽지 않았다.

2.3 2.5D C/SiC의 물성 특성화

2.5D C/SiC의 프리폼의 구조로부터 RVE 단위로 $[0^\circ/\text{Web}/90^\circ/\text{Web}]$ 를 정의할 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 RVE를 하나의 유효강성으로 균질화하여 구조해석에 적용하는 과정을 제안하고자 한다. RVE의 유효강성으로 균질화하는 과정에서 SiC 기지의 비선형성이 반영될 수 있도록 탄소성 특성을 bilinear 함수로 근사하였다. 이 과정을 통해 2.5D C/SiC 소재를 적용한 구조물 설계 시 SiC 기지의 비선형성을 고려한 전체적 거동을 모사할 수 있을 것이다.

유효강성 계산을 위해서는 각 섬유층을 대표하는 섬유와 기지의 기계적 물성을 정의해야 한다. 본 연구에서는 기계적 물성을 0° 인장시험과 $\pm 45^\circ$ 인장-전단 시험의 결과와 수학적 균질화 및 수정된 혼합 법칙을 통해 특성화하였다. 섬유는 횡방향 등방성 재료이고 기지는 등방성 재료로 가정하였다. 단섬유층의

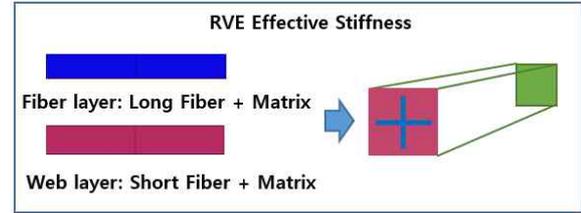


Fig. 7. Effective Stiffness Modeling Concept

web을 구성하는 섬유는 부피분율이 작고 랜덤하게 얽혀있는 구성이므로 기지와 동일한 등방성 재료로 가정하였다.

복합재의 평형 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 σ_{ij} 는 복합재의 응력장, g_i 는 체적력, C_{ijkl}^c 는 강성행렬, ϵ_{kl} 은 변형률장을 나타낸다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + g_i = [C_{ijkl}^c \tilde{\epsilon}_{kl}]_{,j} + g_i = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C_{ijkl}^{eff} &= \frac{V_m}{V} C_{ijkl}^m + \sum_{a=1}^{N_f} \frac{V_a}{V} C_{ijkl}^{c,a} \\ &= v_m C_{ijkl}^m + \sum_{a=1}^{N_f} v_a C_{ijkl}^{c,s,o,a} + \sum_{a=1}^{N_f} v_a C_{ijkl}^{c,noni,s,o,a} \\ &= \left(v_m + \sum_{a=1}^{N_f} v_a \right) C_{ijkl}^m + \sum_{a=1}^{N_f} v_a C_{ijkl}^{c,noni,s,o,a} \\ &= \sum_{a=1}^{N_f} v_a C_{ijkl}^{c,a} + C_{ijkl}^{is} \end{aligned} \quad (2)$$

복합재를 구성하는 RVE의 유효강성행렬은 미소 단위에 대해 섬유의 방향성에 따라 달라질 수 있다. 그러나 재료의 불균일 차이가 크지 않다고 가정하면 RVE 내의 변형률이 모두 일정하다고 가정할 수 있고 유효강성행렬은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 C_{ijkl}^{eff} 는 복합재의 유효강성행렬, V 는 전체 부피, V_m 은 기지의 부피, a 는 섬유의 번호, N_f 는 섬유가 놓여진 방향의 숫자를 의미한다. 상위첨자 a 는 섬유, c 는 복합재, m 은 기지, is 는 등방성을 뜻한다.

2.5D C/SiC의 구조는 balanced orthotropic lamina와 유사하므로 식 (3)과 같이 재료 좌표계로 나타낸 응력-변형률 관계와 전역 좌표계와 재료 좌표계가 θ 만큼 틀어져 있는 경우에 대한 식 (4)와 같은 컴플라이언스의 관계식으로부터 전단 강성을 계산할 수 있다[9]. 여기서 S_{ij} 는 재료좌표계의 컴플라이언스이고 \bar{S}_{ij} 는 전역좌표계의 컴플라이언스이다. 식 (4)의 관계로부터 0° 인장시험으로부터 전역 좌표계와 동일하게 측정된 강성 E 와 $\pm 45^\circ$ 인장-전단시험으로부터 측정된 강성 E_{45X} 를 식 (4)에 대입하면 식 (5)로 나타낼 수 있다. 식 (5)를 통해 계산된 전단 강성은 SiC 기지에 의한 영향이 가장 크게 나타나므로 이를 등방성 기지의 전단 강성으로 가정하였다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

$$S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66})\sin^2\theta \cos^2\theta + S_{66}(\cos^4\theta + \sin^4\theta) \quad (4)$$

$$\frac{1}{G} = \frac{4}{E^{45X}} - \frac{2}{E}(1-\nu) \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\text{exp}}^{0^\circ} & \nu E_{\text{exp}}^{0^\circ} & 0 \\ 1-\nu^2 & 1-\nu^2 & \\ \nu E_{\text{exp}}^{0^\circ} & E_{\text{exp}}^{0^\circ} & 0 \\ 1-\nu^2 & 1-\nu^2 & \\ 0 & 0 & 2G_{\text{exp}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$= (v_a [C]_a + [C]_{is}) \{\epsilon\}$$

$$\frac{E_{\text{exp}}^{0^\circ}}{1-\nu^2} = v_f^0 E_f + 2\mu_{is} + \lambda_{is} \quad (7)$$

2D balanced orthotropic laminate의 평면 응력 상태를 가정하면 인장시험에서 측정된 응력과 유효강성행렬 사이에는 식 (6)의 관계를 만족하게 된다. 그리고 식 (6)을 계산하면 식 (7)과 같이 섬유 방향의 강성을 계산할 수 있다. 여기서 $E_{\text{exp}}^{0^\circ}$ 는 0° 인장시험을 통해 측정된 강성, E_f 와 ν_f^0 는 각각 섬유의 강성과 부피 분율, μ_{is} 와 λ_{is} 는 각각 기지의 Lamé's constant이다.

본 연구에서는 등방성 기지의 탄소성 거동을 bilinear 함수로 근사하였다. 소성 구간에서 발생하는 응력(σ^{45X})은 항복 응력(σ_s^{45X})과 소성 강성(K^{45X}) 및 소성 변형률(ϵ_p^{45X})의 함수로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 탄소성 거동 해석을 위한 파라미터는 ±45° 인장-전단 시험으로부터 얻어진 응력-변형률 선도에 대해 각 구간별로 근사값과 시험값의 오차를 최소화하는 최소자승법을 사용하여 구하였다. Fig. 8은 ±45° 인장-전단 시험의 응력-변형률 선도와 탄성 구간을 제외한 소성 구간에 대한 응력-변형률 선도를 함께 도시한 것이다. 식 (9)와 같이 각 구간별로 범함수를 구성하고 각 미지수에 대한 미분값이 최소가 되도록 식 (10)과 식 (11)을 계산하였다.

$$\sigma^{45X} = \sigma_s^{45X} + K^{45X} \epsilon_p^{45X} \quad (8)$$

$$\Pi = \int_{\epsilon_p^1}^{\epsilon_p^2} (A)^2 d\epsilon_p^{45X} \quad (9)$$

$$A = \underbrace{\left(\sigma_s^{45X} + K^{45X} \epsilon_p^{45X} \right)}_{\text{approximation}} - \underbrace{\sigma^{45X}(\epsilon_p^{45X})}_{\text{experimentation}}$$

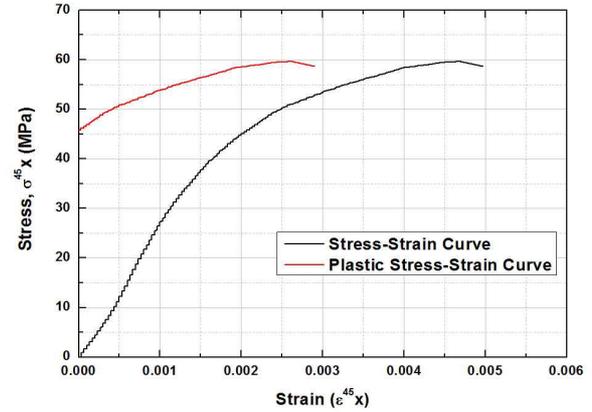


Fig. 8. Stress-Strain Curve of ±45° Tensile-Shear test

$$\delta \Pi_{\sigma_s^{45X}} = \int_{\epsilon_p^1}^{\epsilon_p^2} (B) d\epsilon_p^{45X} = 0 \quad (10)$$

$$B = \sigma_s^{45X} + K^{45X} \epsilon_p^{45X} - \sigma^{45X}(\epsilon_p^{45X})$$

$$\delta \Pi_{K^{45X}} = \int_{\epsilon_p^1}^{\epsilon_p^2} (C) d\epsilon_p^{45X} = 0 \quad (11)$$

$$C = \sigma_s^{45X} \epsilon_p^{45X} + K^{45X} (\epsilon_p^{45X})^2 - \epsilon_p^{45X} \sigma^{45X}(\epsilon_p^{45X})$$

±45° 방향의 응력과 전단 응력의 관계 및 순수 전단에서의 등가 응력으로부터 ±45° 방향의 응력과 등가 응력($\bar{\sigma}_p$)의 관계를 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 아래첨자 11, 22, 12는 각각 재료좌표계의 섬유방향을 나타낸다. 등가 변형률($\bar{\epsilon}_p$)은 ±45° 방향의 탄성계수와 전단계수의 관계 및 순수 전단에서의 등가 변형률로부터 ±45° 방향의 변형률과 등가 변형률의 관계를 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 아래첨자 12는 재료좌표계의 섬유방향을 나타낸다.

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \tau_{12} = \frac{1}{2} \sigma^{45X}, \quad \bar{\sigma}_p = \sqrt{3} \tau \quad (12)$$

$$\rightarrow \bar{\sigma}_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma^{45X}$$

$$\tau_{12} = G_{12} \gamma_{12} = \frac{1}{2} E^{45X} \epsilon_p^{45X}, \quad \bar{\epsilon}_p = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma \quad (13)$$

$$G_{12} = \frac{E^{45X}}{4} \left(1 - \frac{E^{45X}(1-\nu)}{2E} \right)^{-1}$$

$$\rightarrow \bar{\epsilon}_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_p^{45X} \left(1 - \frac{E^{45X}(1-\nu)}{2E} \right)$$

소성구간을 근사하기 위한 등가 항복강도(σ_s)와 등가소성강성(K_{is})의 함수로 근사하면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_p &= K_{is} \bar{\epsilon}_p \rightarrow \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma^{45X} &= K_{is} \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{E^{45X}(1-\nu)}{2E} \right) \epsilon^{45X} \\ \rightarrow \sigma^{45X} &= \frac{4}{3} K_{is} \left(1 - \frac{E^{45X}(1-\nu)}{2E} \right) \epsilon_p^{45X} \end{aligned} \quad (14)$$

섬유 길이 방향의 강성은 제한된 과정을 통해 산출하였으나 횡방향 등방성을 나타내는 강성은 시험과 해석의 오차를 최소화하는 과정을 통해 역해석을 수행하여 추정하였다. 섬유 횡방향의 강성 E2와 횡방향 전단강성 G12를 미지수로 놓고 시험값과 해석값의 하중-변위 선도 오차를 최소화하는 최소자승법을 동일하게 적용하여 해석적으로 값을 산출하였다. 위 과정을 통해 산출한 물성값은 Table 3과 같다.

2.4 유한요소해석

2.4.1 유한요소모델

2.5D C/SiC는 laminate에 가까운 구조이지만 블록을 제작한 후 기계가공을 통해 구성품을 제작하므로 원하는 형태의 적층을 구성하는 것이 용이하지 않다. 따라서 시편마다 적층 상태와 부피분율이 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 0°/90° 평면 방향으로 보강된 장섬유층과 웹 층을 RVE로 놓고 부피분율에 대한 RVE의 유효강성을 구성하도록 모델링하였다. 그리고 기지의 강성은 bilinear 함수의 탄소성 모델로 구성하였으며 상용프로그램인 ABAQUS의 User-defined subroutine을 활용하여 유효강성을 계산하였다. 본 연구에서 구성한 유한요소해석의 전체 흐름도는 Fig. 9와 같다.

2.4.2 인장시편 해석

계산된 섬유와 기지의 강성을 사용하여 0°/90° 인장 시편과 ±45° 인장 시편의 거동 해석을 수행하여 제한된 특성화 과정으로 산출된 물성이 실제 시편 거동을 근사하는지 확인하였다. 0°/90° 인장 시편의 시험과 해석 결과는 Fig. 10과 같고 ±45° 인장-전단 시편의 시험과 해석 결과는 Fig. 11과 같다. 해석 결과는 시험을 적절히 근사하고 있음을 확인할 수 있다. 0° 인장 시편 해석 결과는 하중이 2,200N을 넘어서면서 하중-변위 선도의 기울기가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 시험 결과에서는 거의 선

Table 3. Material properties by characterization

| Fiber | | Matrix | |
|---------------|-------|----------|--------|
| E11 (GPa) | 220.9 | E (GPa) | 28.9 |
| E22=E33 (GPa) | 17.9 | σy (MPa) | 41.2 |
| G12=G13(GPa) | 8.9 | h (MPa) | 5716.1 |

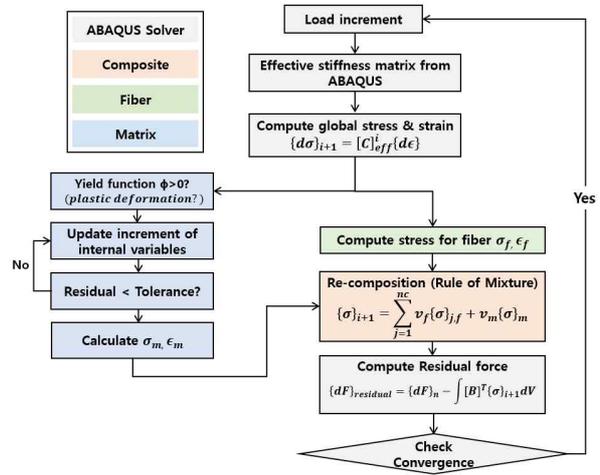


Fig. 9. Overall flow of the analysis in UMAT

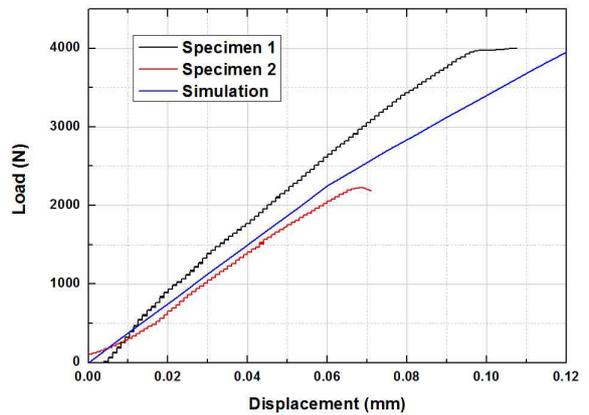


Fig. 10. Load-displacement Curve of 0° Tensile test and simulation

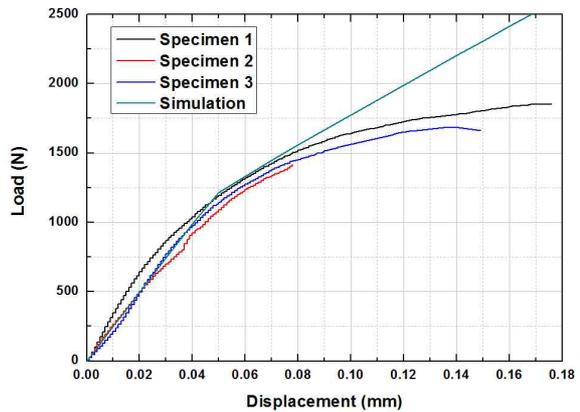


Fig. 11. Load-Displacement Curve of ±45° Tensile-Shear test and simulation

형성을 유지하고 있다. 이는 기지의 탄소성 거동 모사에 따른 영향으로 섬유 방향의 하중에 대해서는 기지의 영향이 실제로는 크게 나타나지 않으나 해석 상에서는 기지의 영향이 반영되고 있다. 그리고 ±45°

인장 시편 해석 결과는 하중이 약 1,220N을 넘어서면서 하중-변위 선도의 기울기가 변하고 있으며 시험 결과는 하중-변위 선도의 기울기가 연속적으로 변하고 있다. $\pm 45^\circ$ 인장 시편은 기지의 거동이 지배적인 시험이고 하중-변위 선도의 연속적인 기울기 변화를 bilinear 함수로 묘사하기에는 한계가 있는 것으로 보인다.

Figure 12는 $0^\circ/90^\circ$ 인장시편과 $\pm 45^\circ$ 인장-전단 시편 변위 0.06mm 적용 시 섬유와 기지의 응력 결과를 나타낸 것이다. $0^\circ/90^\circ$ 인장시편은 섬유, 지지 응력이 모두 gage length 내에서 일정하게 나타나고 있다. $\pm 45^\circ$ 인장-전단 시편은 지지 응력은 gage length 내에서 일정하게 나타나지만 섬유 응력은 $+45^\circ$ 방향과 -45° 방향성을 띄는 것을 확인할 수 있다. 기지의 응력 수준은 $0^\circ/90^\circ$ 인장시편과 $\pm 45^\circ$ 인장시편이 각각 36MPa과 34.9MPa로 유사하게 나타나고 있다. 섬유의 응력 수준은 방향성에 따라 차이를 보이고 있으며 0° 섬유는 약 260MPa, 90° 섬유는 20.9MPa, $\pm 45^\circ$ 섬유는 약 60MPa로 나타났다.

인장 시편은 물성 특성화에 적용된 시험결과이므로 시편의 거동을 적절히 근사하는 것이 타당한 결과이다. 따라서 물성 특성화 과정이 적절한지 확인하기 위해서는 특성화에 적용한 시험 결과 이외의 구조물에 대한 시험과 해석 결과를 비교해야 한다.

2.4.3 굽힘 시편 해석

계산된 섬유와 기지의 강성을 사용하여 3점 굽힘 시편 해석을 수행하였다. Fig. 13은 3점 굽힘 시편의 시험과 해석 결과 하중-변위 선도이다. 해석 결과는

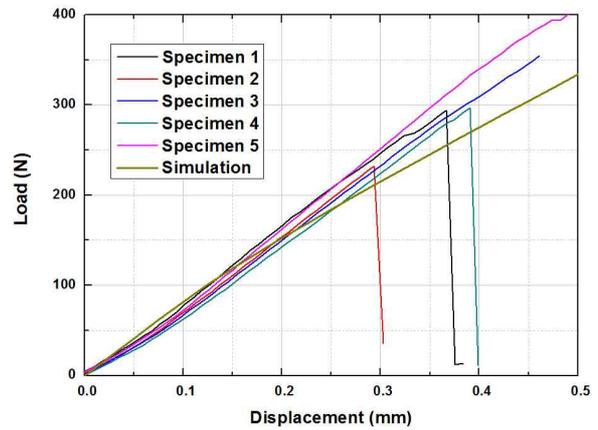


Fig. 13. Load-Displacement Curve of 3 Point Bending test and simulation

시험의 초기 강성을 잘 근사하고 있다. 그러나 변위가 약 0.25mm 지점부터 시험의 하중-변위 선도는 선형적인 특성을 나타내고 있으나 해석의 하중-변위 선도는 강성이 다소 감소하였다.

이는 해석에서 기지의 탄소성 거동으로 인해 강성이 감소한 것이며 0° 인장시험에서도 동일한 결과가 나타나고 있다. Fig. 14는 변위 0.3mm가 작용하였을 때 3점 굽힘 시편의 섬유와 기지의 응력 상태를 나타낸 것이다. 굽힘 거동으로 인해 중립축을 중심으로 시편의 하부는 인장 응력이 나타나고 상부는 압축 응력이 나타나고 있다. 섬유의 길이 방향 응력은 최대 950MPa까지 발생하고 있으며 기지의 응력은 69MPa 수준이다.

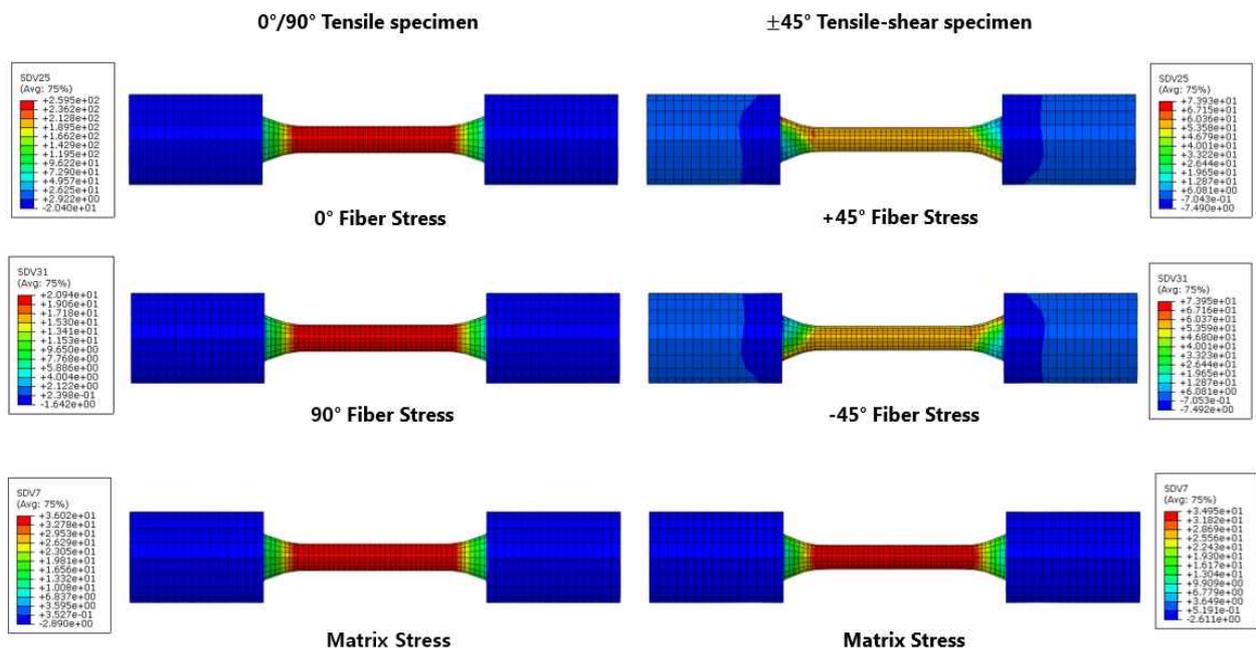


Fig. 12. Stress State of the 0° Tensile Specimen (left) and $\pm 45^\circ$ Tensile-Shear Specimen (right)

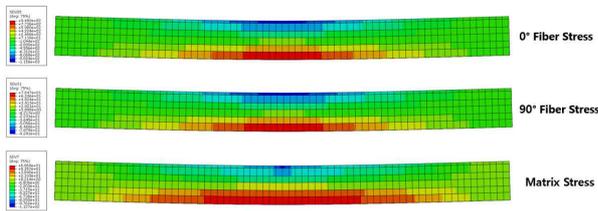


Fig. 14. Stress State of the 3 Point Bending Specimen

III. 결 론

본 연구에서는 2.5D C/SiC 소재에 대한 기계적 물성 시험과 수학적 균질화 과정 및 수정된 혼합 법칙을 적용한 물성 모델링과 해석 기법에 대한 일련의 과정을 제안하였다. 수학적 균질화 과정과 RVE 내의 변형률이 일정하다는 가정을 통해 수정된 혼합법칙을 적용하여 유효강성행렬을 정의하고 시험 결과를 적용하여 섬유와 기지의 선형 탄성 계수를 정의하였다. 그리고 기지의 탄소성 거동을 bi-linear 함수로 근사하고 시험과 해석을 최소화하는 최소 자승법을 적용하여 등가 항복 응력과 등가 소성 강성을 정의하고 이를 통해 RVE의 유효강성행렬을 ABAQUS의 User-defined subroutine을 활용하여 계산하였다. 본 논문에서 제안한 과정을 통해 산출된 섬유와 기지의 기계적 물성을 반영하여 0°/90° 인장시편과 ±45° 인장-전단 시편에 대해 유한요소해석을 수행한 결과 시험의 하중-변위 거동을 잘 근사하고 있음을 확인하였다. 그리고 해석 결과 나타난 응력장은 섬유의 방향에 따른 응력 특성이 잘 나타나고 있었다. 물성 특성화에 적용되지 않은 3점 굽힘 시편에 대해 동일한 기계적 물성 모델링으로 유한요소해석을 한 결과에서도 시험의 하중-변위 선도를 잘 근사하고 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 기계적 물성 특성화와 수정된 혼합 법칙을 적용한 물성 모델링 기법을 통해 2.5D C/SiC를 적용한 구조물의 거동 특성을 적절하게 근사할 수 있다.

References

- 1) Francois, B., Celine, Z., Thierry, P. and Florent G., "Development and flight qualification of the C-SiC thermal protection systems for the IXV," *Acta Astronautica*, Vol. 124, February 2016, pp. 85~89.
- 2) Francois, B., Thierry, P. and Renaud B., "IXV Thermal Protection System Post-Flight Preliminary analysis," *7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences*, June 2017.
- 3) Bernhard, H., "Carbon Fibre Reinforced SiC Materials based on Melt Infiltration," *Proceedings of the 6th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites*, 2007.
- 4) Zhen, C., Guodong, F., Junbo, X. and Jun, L., "Experimental study of high-temperature tensile mechanical properties of 3D needled C/C-SiC composites," *Material Science & Engineering A*, Vol. 654, December 2016, pp. 271~277.
- 5) Junbo, X., Jun, L., Guodong, F. and Zhen, C., "Effect of needling parameters on the effective properties of 3D needled C/C-SiC composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 117, June 2015, pp. 69~77.
- 6) Kaiser, C., Weihs, H., Wittke, H. and Obst, A., "Failure Criteria for Non-Metallic Materials-Part II: Ceramic Matrix Composites," *Proceedings of the 11th Europeans Conference on Composite Materials*, May 2004.
- 7) Lim, H. J., Choi, H. I., Lee, M. J. and Yun, G. J., "Elasto-plastic damage modeling and characterization of 3D needle-punched Cf/SiCm composite materials", *Ceramics International*, Vol. 46, March 2020, pp. 16918~16931.
- 8) Yoon, B. I., Kim, M. J., Kim, J. S., Kwon, H. J., Youn, S. T. and Kim, J. I., "Study on Improvement of Mechanical Property, Oxidation and Erosion Resistance of SiC Matrix Ceramic Composites Reinforced by Hybrid Fabric Composed of SiC and Carbon Fiber," *Composite Research*, Vol. 32, No. 3, June 2019, pp. 148~157.
- 9) Gibson, R. F., *Principles of Composite Material Mechanics*, 1st Ed., McGraw-Hill, New York, 1994, pp. 34~55.