

이산화 기법을 이용한 링프레임 복합재의 기계적 물성 예측

전용운* · 김용하* · 김평화* · 김휘엽* · 박정선**†

A prediction of Ring Frame Composite Properties Using Discretization Method

Yong Un Jeon*, Yong Ha Kim*, Pyung Hwa Kim*, Hwi yeop Kim*, Jung Sun Park**†

ABSTRACT

The use of composites is increasing for lightweight aerospace structures. Among these structures, the ring frame and the parts of the projectile body are mainly made of a fiber reinforced composite material which is less susceptible such as delamination to structural damage. As the use of fiber reinforced composites increases, interest in modeling efficient methods of stiffness and strength is increasing. This paper predict the mechanical strength according to the repeating unit cell(RUC) of the 2-D triaxial braided composites of fiber reinforced composites. Yarn slice definition, incremental approach and stiffness reduction model were used as strength prediction. Finally, the results of strength prediction are verified by comparing with experimental data of 2-D triaxial braided composites specimens.

초 록

항공우주 구조물은 경량화를 위하여 복합재의 사용이 증가하고 있다. 이러한 구조물 중 추진기관에 해당하는 발사체 동체의 링 프레임 및 부품은 구조적 파손에 덜 취약한 섬유 강화 복합재를 주로 사용한다. 섬유 강화 복합재의 사용이 증가함에 따라 강성 및 강도의 효율적인 설계 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 논문에서는 섬유 강화 복합재 중 2차원 3축 브레이딩 복합재의 단위 체적형상(Repeating Unit Cell, RUC)에 따른 기계적 강도를 예측하였다. 강도 예측 기법으로 섬유다발의 이산화 기법을 통한 섬유조각(Yarn Slice) 정의, 증분 접근법, 강성저하 모델 등을 사용하였다. 마지막으로 예측된 강도와 시험결과를 비교하여 본 논문에서 정의한 예측 기법의 정확도를 검증하였다.

Key Words: RUC(반복단위격자), Discretization(이산화), Strength Prediction(강도예측), Incremental Approach(증분 접근법), 2-D Triaxial Braided Composite(2차원 3축 브레이딩 복합재)

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jungsun@kau.ac.kr

직물 복합재(textile composite)는 섬유다발이 교차하는 구조를 가지며, 제작 공정 기술의 발전으로 평직, 주자직, 브레이딩 등의 다양한 구조적 형태로 제작이 가능하다. 또한 교차된 섬유다발의 구조로 층간분리(delamination) 등 구조적 파손이 일반적인 적층 복합재와 비교하여 덜 취약하고, 금속재보다 가벼운 장점이 있으며, 균형된 평면 성질, 유연성이 좋은 특징이 있다. 하지만 직물 복합재는 섬유(fiber)의 종류, 브레이딩 각도, 섬유 다발의 형상과 사양 등의 제작 변수에 따라 기계적 물성이 달라질 수 있으며, 제작 변수를 고려한 시편 시험을 수행하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다는 단점이 있다. 또한 유한요소모델을 이용한 직물 복합재의 기계적 강도 예측 역시 교차되는 구조의 복잡한 형상으로 인하여 모델 생성에 많은 시간이 요구된다는 단점이 있다[1].

따라서 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 직물 복합재 중 2차원 3축 브레이딩 복합재에 이산화 기법을 이용하여 기계적 강도를 해석적으로 예측하였다. 우선 2차원 3축 브레이딩 복합재에서 가장 기본적인 구조인 두 가지의 섬유 다발이 교차하는 반복단위격자(Repeating Unit Cell, RUC)를 근사적으로 설정하고 그에 따른 기하학적 함수를 정의하였다. 정의된 반복단위격자 내의 braider yarn은 교차구조 때문에 섬유다발의 형상이 직선구간(straight portion)과 물결 모양구간(undulating portion)을 갖는다. 각 구간에 대하여 이산화(discretization)기법을 적용하여 섬유 조각(yarn slice)을 정의하였고 정의된 섬유 조각에 대하여 증분 접근법(incremental approach)을 사용하여 각 섬유 조각의 응력과 변형률을 계산한 후 이를 파손 기준(failure criteria)에 대입하여 강도를 예측하였다. 마지막으로 예측된 기계적 강도와 시편 시험 결과와 비교하여 예측된 강도의 정확도를 검증하였다.

본 연구를 통하여 직물 복합재가 적용될 링 프레임 구조물 및 다른 항공 우주 구조물에 대하여 기계적 강도를 예측하고, 이를 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

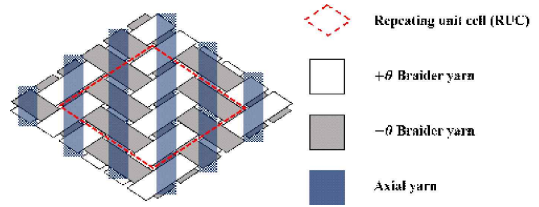


Fig. 1 Determination RUC geometry of 2D triaxial braided composite

2. 브레이딩 복합재의 강도 예측 방법

2.1 RUC의 섬유다발 이산화

2차원 3축 브레이딩 복합재의 반복단위격자(RUC)는 braider yarn, axial yarn으로 구성되어 있다. 따라서 반복단위격자의 기계적 강도는 RUC를 구성하는 각 섬유다발을 섬유 조각으로 이산화하여 예측한다. 이때 섬유다발이 교차된 구조를 갖는 braider yarn의 경우 직선구간을 1개의 섬유 조각으로 이산화하고, 물결구간은 n개의 조각으로 이산화한다. Axial yarn의 경우 전체 길이를 1개의 섬유 조각으로 이산화 한다.

섬유 조각에 대한 방향각도는 Fig. 2와 같이 브레이딩 각도를 나타내는 면내방향(in-plane)각도, θ 와 정의된 전체 좌표계 X-Y 평면에 대한 면외방향(out-of-plane)각도, β 로 정의한다. 면내 방향 각도 θ 는 브레이딩 각도를 의미하며, 면외 방향 각도 β 는 Eq. 1과 같이 섬유다발의 중심선 경로 Z_c 와 섬유조각의 국부 x좌표 X_c 로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{dZ_c}{dX_c} \right) \quad (1)$$

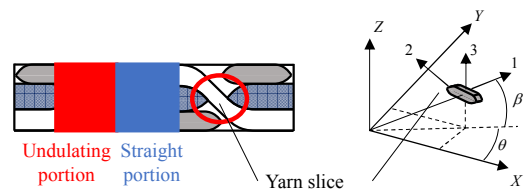


Fig. 2 Local coordinate(123) of yarn slice on undulating portion

2.2 강도 예측 알고리즘

2차원 3축 브레이딩 복합재의 강도를 예측하기 위하여 섬유 다발을 가로 등방성(transversely isotropic)의 재료 특성을 갖는다고 가정하였고, RUC의 변형률과 이산화된 섬유 조각의 변형률이 서로 동일한 등 변형률 가정(iso-strain assumption)을 이용하였다. 그리고 RUC 전체 좌표계(XYZ)와 섬유 조각의 좌표계(123) 및 각 좌표계 사이의 변환행렬(transformation matrix, T)를 정의하고, 응력 평균화 기법(stress averaging technique)을 사용하여 유효 강성 행렬(C_{eff})을 계산하였다.

RUC의 강도 예측은 섬유조각의 파손에 따라 결정되며, 파손여부를 판단하기 위해 섬유조각 각각의 국부 응력과 국부 변형률을 Eq. 2, 3과 같이 계산하였다.

$$\{\Delta\bar{\varepsilon}\}_i = [S_{eff}] \{\bar{\sigma}_i + \Delta\bar{\sigma}\} \quad (2)$$

$$\{\Delta\sigma_{ys}\}_i = [C']_{i-1} [T] \{\Delta\bar{\varepsilon}\}_i \quad (3)$$

Equation. 2는 증분 응력(incremental stress, $\Delta\bar{\sigma}$)을 작용하였을 경우 RUC의 컴플라이언스 행렬(S_{eff})을 사용하여 전체 변형률(macro strain, $\Delta\bar{\varepsilon}$)을 계산하는 식이며 Eq. 3은 좌표변환행렬(T)과 각 섬유조각의 강성 행렬($[C']_{i-1}$)을 사용하여 섬유 조각의 응력($\Delta\sigma_{ys}$)을 계산하는 식이다.

계산된 각 섬유조각의 국부 응력 및 변형률을 다음과 같은 파손기준과 비교하여 파손여부를 판단한다.

- 섬유지배 파손모드 : 최대 변형률 기준
- 수지지배 파손모드 : 최대 응력 기준

또한 섬유 조각의 파손이 발생하였을 경우, 강성저하모델[2]을 사용하여 유효강성행렬을 다시 계산한 후, 이를 Eq. 2에 적용하여 반복적으로 섬유조각의 국부 응력 및 변형률을 계산한다.

최종적으로 RUC 전체의 파손여부를 판단하기 위해 다음과 같은 파손 기준을 정의하였다.

1. 축방향 섬유다발(axial yarn)이 RUC내 어떤 부위에서든지 파손이 발생한 경우
2. 모든 섬유조각이 동일한 파손모드에서 파손되었을 경우

3. RUC 강도 예측 결과

강도 예측 검증에 사용된 2차원 3축 브레이딩 복합재는 브레이딩 각도 50°, 60°, 66°의 총 3가지 종류의 시편으로 인장시험을 진행하여 강도를 측정하였다. 시험 결과 값과 예측 기법을 통해 계산된 강도 값을 비교 및 검증하여 Table 1에 나타내었다. 강도 예측 값과 시험 결과 값은 브레이딩 각도가 50°일 때, 약 3%, 60°일 때 3.61%, 66°일 때 6.74%의 오차를 가지는 것을 확인하였다.

Table 1. Comparison of test result and prediction result

Braiding angle	Test result [MPa]	Prediction result [MPa]	Error [%]
50°	985.70	1,016	3.07
60°	849.31	880	3.61
66°	823.52	768	6.74

4. 결론

본 논문은 섬유 다발을 이산화하여 2차원 3축 브레이딩 복합재의 강도를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 예측된 강도 값은 시험 값과 비교하여 93%의 높은 정확도를 가지는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서 정의한 예측 기법을 다양한 직물 복합재에 적용한다면, 시편 시험, 유한요소 해석 없이 근사 강도 값을 효율적으로 예측할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. Rajiv A. Naik, "Failure Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites," NASA Contractor Report 194981, September. 1994.
2. Blacketter, D.M., "Modeling Damage in a Plain Weave Fabric-Reinforced Composite Material," Journal of Composites Technology and Research, JCTRER, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 136-142