

평직 복합재료의 기계적 거동에 있어서의 저 균일도 문제

우경식, 서영욱*

충북대학교 구조시스템공학과

1. 서론

평직 복합재료(Plain weave textile composites)는 그림 1에서 보는 바와 같이 두 개의 섬유다발이 서로 직교를 이루며 꼬여있는 구조로 매우 복잡한 미세구조를 가지고 있다. 평직 복합재료의 프리폼(Preform)은 경사(Warp tow)에 위사(Fill tow)를 삽입하여 직조되는데, 여기에 수지를 먹인 후 정해진 형상의 몰드에 적층하여 양생시키면 직물복합재 구조물이 탄생된다. 최근까지 평직 복합재료는 항공우주산업에서 주로 사용되어 왔으나, 제조기술이 발달함에 따라 비용 면에서도 경쟁력 있는 복합재료가 생산되었고 이로 인해 자동차, 선박, 토목·건축 및 스포츠 용품에까지 그 사용범위가 확대되고 있는 추세이다.

평직 복합재료는 거시적으로는 평면구조이나 미시적으로는 복잡한 3차원 구조물이다. 즉, 미세구조의 특성길이는 거시구조의 특성길이와 비교해 볼 때 결코 작지 않다. 이 때문에 평직 복합재료의 기계적 거동은 미세구조 요소들인 섬유다발의 굵기도나 적층 수 변화에 크게 영향을 받게된다. 기존의 연구들에서 미세구조의 기하적 변화에 따라 복합재료의 특성치에 미치는 영향이 일부 연구된 바 있다[1,2].

본 논문은 수치 실험을 통하여 평직 복합재료의 기계적 거동에 있어서의 적층 위상각에 따른 저 균일도 문제를 조사하였다. 단순히 4장으로 적층된 복합재료 단위구조 모델과 4장 단위로 무한히 반복되는 단위구조 모델 각각에 대해 경사 방향의 위상각(Phase angle) 변화를 고려하였다. 또한 이로부터 얻은 수치적 결과를 통해 위상각 변화로 인한 탄성계수의 변화를 검토하였고, 통계처리를 통해 저 균일도 문제를 조사하였다.

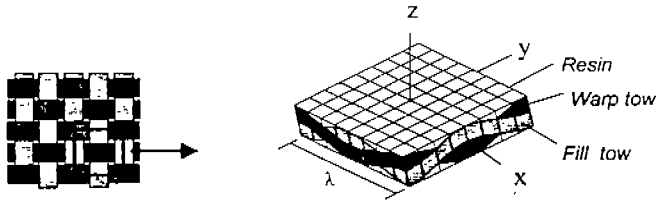


Fig. 1. A Fiber tow geometry for plain weave textile composites.

2. 유한요소해석

2.1 해석 모델링

평직 복합재료의 섬유다발의 기하적 형상은 여러방법으로 모델링할 수 있으나 본 연구에서는 볼록렌즈 형태(Lenticular)의 단면이 사인곡선의 경로를 따라 이동한다고 가정하여 모델링하였다. 이렇게 하면 x -방향을 따라 이동하는 경사의 중심선 경로는 다음과 같이 쓸 수 있다.

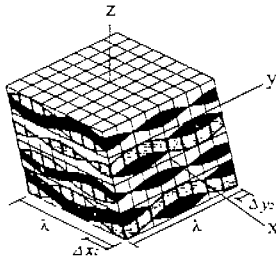
$$z = \frac{h}{4} \sin\left(\frac{x}{\lambda} + \varphi_x\right) + C \quad (1)$$

여기서 λ 는 파장, h 는 층 두께, φ_x 는 위상각을 나타낸다. y -방향으로 이동하는 위사에 대해서도 이와 유사한 방법으로 모델링 된다.

평직 복합재료의 해석을 위한 단위구조 모델이 항상 대칭 혹은 역대칭으로 적용되는 것은 아니다. 종종 평직 직조구조의 적용 층들은 x -방향과 y -방향으로 위상각의 변화를 보인다. 그림 2와 같이 i 번째 층이 첫 번째 층에 비하여 x -방향으로 Δx_i , y -방향으로 Δy_i 만큼 이동하여 적용되었다고 했을 때, z -방향으로 i 번째와 $i+1$ 번째 층간의 경사들 사이에서는 x -방향으로 $\Delta x_{i+1} - \Delta x_i$ 만큼의 이동이 발생하고, z -방향으로 i 번째와 $i+1$ 번째 층간의 위사들 간에는 y -방향으로 $\Delta y_{i+1} - \Delta y_i$ 만큼의 이동이 발생하게 된다. 섬유다발의 중심선의 경로가 (1)식과 같이 사인 곡선의 형태로 모델 되었으므로 이들 횡이동은 다음과 같이 위상각으로 표현될 수 있다.

$$\varphi_{x_i} = \frac{\Delta x_i}{\lambda} \times 360^\circ, \quad \varphi_{y_i} = \frac{\Delta y_i}{\lambda} \times 360^\circ \quad (2)$$

단, 여기서 첨자 i 는 아래서 부터의 층번호이다. 그림 2는 예로 두 번째 층에 대한 위상각을 나타내고 있다.



$$\varphi_{x_2} = \frac{\Delta x_2}{\lambda} \times 360^\circ$$

$$\varphi_{y_2} = \frac{\Delta y_2}{\lambda} \times 360^\circ$$

Fig. 2. Arbitrarily stacked layers of plain weave textile composites.

본 연구에서는 적층수가 4장인 유한 단위구조 모델과 아주 두꺼운 관에 해당하는 4장 단위로 무한히 반복되는 단위구조 모델에 대하여 해석을 수행하였다. 실제로는 x -와 y -방향 모두의 위상각 변화가 있게되나 본 연구에서는 x -방향의 위상각 변화만을 고려하였다. 첫 번째 층은 위상각이 0으로 고정되었고, 2~4층의 위상각을 각각 0° 에서 337.5° 까지 22.5° 씩 변화시켜 계산을 수행하였다. 이와같은 방법을 취하면, 각 층은 16가지의 경우를 갖게되어 가능한 모든 경우의 수는 $16^3=4096$ 개가 된다. 그러나 연내방향 및 두께방향의 대칭 및 비대칭 적층 위상각 등을 고려하면, 계산에 요구되는 경우의 수를 최소화 할 수 있다.

2.2 매크로요소

평직 복합재료의 미세구조는 매우 복잡하여 정확한 모델링이 어렵고, 기존의 유한요소법에 의한 해석에는 많은 양의 계산시간과 기억용량이 요구된다. 본 연구에서는 계산자원 요구조건을 절감하기 위하여 매크로요소[3]를 이용하여 평직 복합재료의 기계적 거동을 계산하였다. 매크로요소는 요소 내부에 미세구조를 가진 요소로 정의된다. 여기에는 단일 변위장(single-field)과 다중 변위장(multi-field)의 두 가지 형태가 있는데, 본 연구

에서는 다중 변위장 마크로요소가 사용되었다.

2.3 재료의 특성치

본 연구에 사용된 평직 복합재료의 단위구조는 경사와 위사의 섬유다발과 수지로 구성되어 있다. 섬유다발은 다시 섬유와 수지로 되어 있으나 여기서는 균일하다고 가정하였다. 각 구성재료의 특성치는 다음과 같다[4].

섬유다발(graphite-epoxy):

$$E_{11} = 206.9 \text{ GPa}, E_{22} = 5.171 \text{ GPa}, \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0.25, G_{12} = G_{13} = 2.386 \text{ GPa}, G_{23} = 2.068 \text{ GPa}$$

수지(epoxy):

$$E = 3.45 \text{ GPa}, \nu = 0.35$$

3. 계산결과 및 검토

그림 3은 2층의 위상각을 22.5° 씩 증가시키면서, 3, 4층의 위상각을 변화시켰을 때, 구간별 탄성계수 E_{xx} 값의 분포 변화를 보여주고 있다. 이때 ϕ_2 가 특정 위상각을 갖는 한 구간에 대한 경우의 수는 3, 4층이 각각 16개의 위상각을 갖게되므로 $16^2=256$ 개이다. 여기서는 분포 비교를 용이하게 하기위해 $\phi_2=360^\circ$ 인 경우는 $\phi_2=0^\circ$ 일 때의 값으로 나타내었다 (360° 는 0° 인 경우와 같으므로).

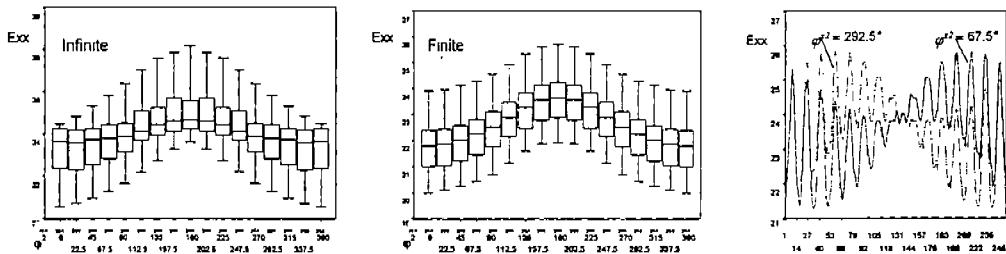


Fig. 3. Distribution of the extensional moduli in the x-direction vs the fiber tow phase angle.

이 그림에서 계산된 등가 탄성계수는 2층의 위상각이 θ 일 때와 $2\pi - \theta$ 일 때 동일한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 2.1절에서 언급한 바와 같이, 적층모델에서 위상각을 변화시킨 모든 층의 위상 각이 θ 와 $2\pi - \theta$ 의 관계를 가질 때 동일한 등가 탄성계수값을 가짐을 보여주고 있다. 이는 위상각이 $(0/\theta \leq \theta \leq 360)$ 인 경우와 $(0/2\pi - \theta \leq 2\pi - \theta \leq 360)$ 인 경우는 같은 결과를 보이므로 후자의 경우의 계산을 하지 않아도 됨을 보여준다. 이 그림은 또한 위상각의 변화에 따라서 등가탄성계수의 값이 크게 변화함을 보여주고 있다.

그림 4는 4장의 유한 및 무한반복 단위구조에서 적층 위상각의 변화에 따른 등가탄성계수를 통계적으로 처리한 결과를 나타내고 있다. 적층수가 4장인 유한 단위구조 모델의 경우 등가탄성계수는 작은 수치 쪽으로 약간 치우친 분포를 보이고 있다. 무한 단위구조 모델의 경우에는 탄성계수가 중간값을 중심으로 거의 대칭으로 정규분포와 유사한 분포를 보였지만, 변화의 범위가 넓은 것에 비해 대부분의 값이 중간값 주변에 밀집되어 있는 분포를 보였다. 또한 두 모델의 평균값을 비교해 보면, 유한 단위구조 모델이 무한 모델에 비해 작은 수치를 있는데, 이는 적층수가 증가할수록 자유경계면 효과가 전체 구조물에 미치는 영향이 감소되기 때문으로 보인다[2].

그림 4의 Boxplot에서 두 모델의 최대-최소값의 차이는 무한반복 단위구조 모델이 31.1%에 달하여 유한모델의 25.2%에 비하여 큰 값을 보이고 있다. 그러나 평균으로부터 25%이내에 있는 값의 범위를 비교하면, 유한모델의 경우에 변화범위가 더 커서 무한 모델에 비하여 균일도가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

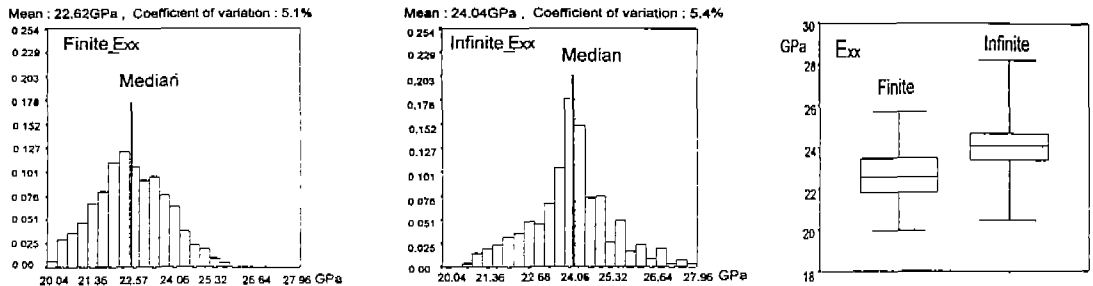


Fig. 4. Statistical distribution of E_{xx} for finite and infinite 4-layer plain weave unit cell model.

4. 결론

본 논문에서는 평직 복합재료의 기계적 거동에 있어서의 저 균일도 문제를 조사하였다. 적층수가 4인 유한 및 무한 단위구조 모델에 대하여 x -방향의 위상각 변화에 따른 동가 탄성계수 E_{xx} 값을 수치적으로 계산하였다.

계산결과 평직 복합재료의 탄성계수는 적층 위상각의 변화에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다. 유한 모델의 경우 동가 탄성계수를 통계적으로 처리한 결과에 의하면 자유 경계면 효과에 의해 작은 수치쪽으로 약간 치우친 분포를 보였다. 무한 반복모델의 경우 탄성계수는 중간값을 중심으로 거의 대칭으로 정규분포에 근접했지만, 변화범위가 넓은 것에 비해 대부분의 값이 중간값 주변에 밀집됨으로써 완전한 정규분포라고 할 수는 없었다. 또한 동가탄성계수의 평균으로부터 25% 이내에 포함된 값의 범위는 유한모델의 경우가 더 큰 값을 보여 좀 더 낮은 균일도를 보였다. 또한, 두 경우의 평균치를 비교했을 때, 유한모델의 경우가 무한모델의 경우에 비하여 낮은 탄성계수를 가지고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 x -방향의 위상각 변화로 인한 평직 복합재료의 특성치의 변화가 연구되었다. 실제적인 문제에 있어서는 y -방향으로도 위상각의 변화가 있게 되므로 이를 고려하여 연구를 수행할 필요가 있다. 이 때에는 계산 경우의 수가 매우 증가하게 되므로 효율적인 해석전략이 요구될 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

- [1] Whicomb, J., Kondagunta, G. and Woo, K., Boundary effects in woven composites. *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No.4, 1995, pp. 507-524.
- [2] Woo, K. and Whicomb, J.D., Effects of fiber tow misalignment on the engineering properties of plain weave textile composites. *Composite Structures*. Vol. 37, No. 3/4. 1997, pp. 343-355.
- [3] Whicomb, J.D. and Woo, K., Enhanced direct stiffness method for finite element analysis of textile composites. *Composite Structures*, Vol. 28, 1994, pp. 385-390.
- [4] Jones, R. M., *Mechanics of Composite Materials*. Scripta Book Co., Washington, DC, 1975.