

직물 복합재료의 면외 방향 등가 물성치 예측에 관한 연구

우 경 식* · 김 필 증**

Prediction of Out-of-plane Properties for Woven Composites

K. Woo, P. J. Kim

KEY WORDS : 단위구조해석, Phase shift(위상차), Waviness(섬유 굴곡도), CTE(열팽창계수)

ABSTRACT

In this study, out-of-plane properties and CTEs were predicted for 8-harness satin weave textile composites. The properties were calculated by unit cell analysis for configurations with varied waviness ratio and phase shifts. Macro elements were employed to reduce the computer resource requirement. It was found that the out-of-plane properties and CTEs were varied as the phase shift changed. However the dependency was much weaker than the in-plane properties.

1. 서 론

항공우주산업을 발전시키는 과정에서 사람들은 끊임없이 재료의 경량화와 성능 향상에 매진해왔다. 그러한 노력으로 인해 여러 복합재료를 개발하게 되었고 최근에는 각종 기술력이 부가된 첨단 복합재료들이 많이 개발되고 연구도 활발히 진행되고 있다. 이들 복합재료들 중 직물복합재료는 섬유 또는 섬유다발의 꼬임에 의해 강화된 구조용 재료이다. 직물복합재료는 형태를 어떻게 구성하느냐에 따라 다양한 형태로 변화가 가능하다. 직물복합재료는 일방향 복합재료에 비해 면외 방향에 대해서 기계적 특성이 우수하고 충격에 잘 저항하며 제작기술의 발달로 가격 경쟁면에서도 일방향 복합재료와 견줄 만하여 최근 그 사용이 증가하고 있다.

직물복합재료는 경사(Warp)와 위사(Fill) 그리고 순기지(Resin)의 세가지 서로 다른 재료들로 복합되어 만들어진다. 직물복합재료는 제작하는 방법에 따라 여러 가지로 구분되어 질 수 있는데 경사와 위사가 한번씩 교차되게 제작된 것을 평직복합재료(Plain Weave)라 하고 경사 두 가닥과 위사 한 가닥이 반복되게 교차하는 것을 능직(Twill)이라

하며, 그 이상부터는 반복되는 수를 이용해 4 매 주자직(4-Harness Satin Weave), 5 매 주자직(5-Harness Satin Weave), 8 매 주자직(8-Harness Satin Weave) 등으로 분류된다. 이들 직물 복합재료의 기계적 거동을 정확히 예측하기 위해서는 각각 구성하고 있는 재료의 특성과 기하학적 형상, 그리고 서로간의 경계조건을 고려해야 한다.

현재까지 직물 복합재료의 기하학적 형태 및 일반적인 기계적 거동에 대한 연구는 매우 활발하게 진행되어 왔다. 이들 연구들에서는 대체적으로 단순 대칭 적층된 직물 복합재료에 대한 등가물성치의 예측[1]과 각 인접한 층간 위상차(Phase Shift)에 따른 등가물성치의 예측[2,3]에 대해 다루고 있다. 그러나 이들 연구에서는 주로 섬유의 주 방향에 대한 E_{xx} , G_{xy} , ν_{xy} 등에 대하여 다루고 있고 면외 방향 E_{zz} , G_{xz} , ν_{xz} 등에 대한 등가 물성치 연구는 미미한 상황이다. 실제 구조물의 설계에 있어서는 모든 방향에 대한 물성치에 대해 알고있어야 하기 때문에 정확한 설계조건을 위해 직물 복합재료의 모든 방향에 대한 물성치 및 변화조건에 따른 면외방향 물성치들의 변화되는 정도에 대한 예측이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 8 매 주자직에 대해 섬유의 굴곡도 변화와 적층수의 증가 및 위상차에 대해 면내, 면외 방향 등가물성치의 변화를 연구하였다. 적층의 수는 1 에서 4 까지 변화시키며 실행하였고 하나의 반복되는 단위 구조에서 1/8 씩의 위상차를

* 충북대학교 구조시스템공학과 교수

** 충북대학교 구조시스템공학과

변화시키면서 진행하였다. 또한 섬유 굵기의 비율은 1:3.25 인 것과 1:6.4 두가지 경우에 대해 연구하였다.

2. 단위구조해석

단위구조해석은 어떤 단위구조 모델들이 같은 모양으로 계속해서 반복된다고 판단하여 계산량을 줄이고 신뢰있는 결과를 얻기 위해 사용되어지는 방법으로 반복단위의 기초가 되는 단위구조를 이용하여 반복 경계조건과 하중조건을 이용하여 해석되어진다.

본 연구에서는 8 매 주자직 구조의 섬유다발이 반복적으로 이루어진다는 것에 의하여 X-,Y-축으로 연속되어진 무한 평판에 두께를 증가시키는 방법을 사용하기 위해 XY 평면에 대해 연속성을 위한 3 개의 경계조건을 주어 단위구조를 형성한 뒤 Z 축 방향으로 두께를 늘이면서 진행하였다.

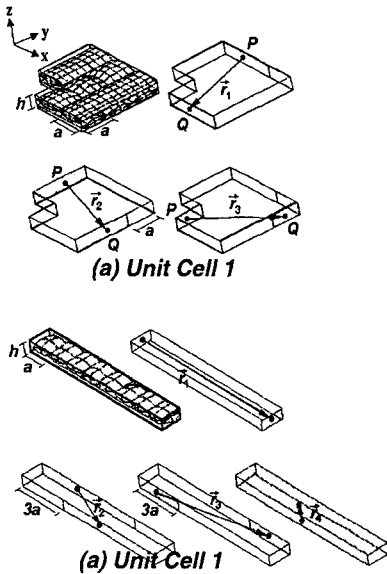


Fig 1 Periodicity vectors of unit cell

XY 평면에 대한 반복 경계조건으로 다음의 벡터를 사용하였다.

$$\vec{R}_l = \Delta X_l \vec{i} + \Delta Y_l \vec{j} \quad (l = 1, 2 \text{ or } 3) \quad (1)$$

여기서 $\Delta X_l, \Delta Y_l$ 는 반복 경계면이 반복되는 다음 경계면까지의 x, y 의 이동량을 나타낸다. 만약 벡터의 시작면이 되는 곳의 한 점을 P 라고 정의한다면 시작면에 해당되는 반복 벡터만큼 옮겨진 곳에 P 점을 대신하는 Q 점이 반드시 존재해야 조건을 만족하게 된다.

$$\vec{P} + \vec{R}_l = \vec{Q} \quad (2)$$

또한 추가적으로 Z 방향의 하중조건을 포함하여

계산되어지는 E_{zz}, G_{xz} 등을 위하여 다른 하나의 반복 경계 조건을 나타내는 벡터 \vec{R}_4 를 사용하였다. \vec{R}_4 의 경우 두께 정도에 따라 변화되어야 하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{R}_4 = n\vec{k} \quad (n = \text{No. of layer}) \quad (3)$$

여기서 n 은 적층된 층의 개수를 나타낸다. 그림 1 은 반복 경계조건을 그림으로 도식화한 것이다.

3. 해석 모델

직물 복합재료의 모델링은 여러가지 방법으로 접근할 수 있으나[eg.6-8] 본 연구에 있어 단위구조해석을 매크로요소를 이용하여 진행하였는데 매크로요소의 강성행렬은 부메쉬의 강성행렬 식에서 내부 자유도를 정적 압축하여 제거한 후 경계면 자유도에 대한 강성행렬식을 변환하여 구하게 된다. 매크로요소 내부의 미세구조는 각각의 부 메쉬에 의해 정의된다. 그림 2 는 이번에 사용된 단위구조의 각 부 메쉬에 해당하는 미세구조를 나타낸다. 각각의 물성치인 $E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$ 에 대해서는 5 차 다중 변위장 매크로요소를 사용하였다.[4] 서로 다른 굵기도를 갖는 요소들은 굵기도가 1/3.25 인 매크로요소로 계산을 마친 후 요소에 대해 스케일링을 하여 동일한 형태를 가지며 굵기도가 1/6.4 인 매크로요소를 형성하여 사용하였다. 그리고, 온도변화에 따른 열팽창계수(CTE)를 계산함에 있어서는 5 차 단일 변위장 요소를 사용하였다. 일반적으로 다중 변위장 요소는 내부에 절점이 없으나 단일 변위장 요소는 절점이 있는 것이 특징이다.

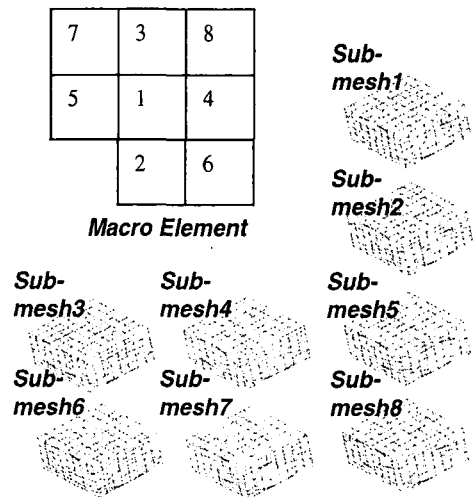


Fig 2 Sub-meshes for 8 harness satin weave

해석 전략

본 연구에서는 부메쉬를 단위구조의 1/8 만큼의 크기로 나누었고 총 8 개의 부메쉬를 가진다. 이에 의거하여 적층이 된 후 서로 인접한 두 층 사이에서 부메쉬 하나만큼의 이동을 시켜 서로 다른 8 개의 위상차를 갖도록 정의하였다. 따라서 네 장의 경우 해석량은 $8^3 = 512$ 개가 된다.

본 연구에서는 적층수를 1에서 4 까지 증가시키며 해석을 진행하였다. 또한 적층수 2, 3, 4 에 대해서는 각각 8, 64, 512 개의 많은 데이터의 양을 가지게 되므로 이들 데이터에 대해서는 평균, 최대, 최소 그리고 이러한 수치들의 분포에 대한 신뢰도를 위하여 평균화 된 CV 계수를 이용하였다. 요구되어지는 면의 즉 두께방향의 등가 탄성계수를 구하기 위해 사용되어진 단위구조에 사용한 경계조건은 다음과 같다.

E_{zz} 에 대해서 \bar{r}_4 의 경우

$$\begin{aligned} u(\bar{x}_P) &= u(\bar{x}_Q) \\ v(\bar{x}_P) &= v(\bar{x}_Q) \\ w(\bar{x}_P) + \bar{r}_{4z} \varepsilon_{zz} &= w(\bar{x}_Q) \end{aligned} \quad (4)$$

\bar{r}_i ($i=1,3$)의 경우

$$\begin{aligned} u(\bar{x}_P) - \bar{r}_{ix} v_{zx} \varepsilon_{zz} &= u(\bar{x}_Q) \\ v(\bar{x}_P) - \bar{r}_{iy} v_{zy} \varepsilon_{zz} &= v(\bar{x}_Q) \\ w(\bar{x}_P) &= w(\bar{x}_Q) \quad (i=1,3) \end{aligned} \quad (5)$$

γ_{xz} 의 경우

$$\begin{aligned} u(\bar{x}_P) + \bar{r}_{4z} \frac{\Delta \hat{u}}{\Delta z} &= u(\bar{x}_Q) \\ v(\bar{x}_P) &= v(\bar{x}_Q) \\ w(\bar{x}_P) \hat{\varepsilon}_{zz} &= w(\bar{x}_Q) \end{aligned} \quad (6)$$

\bar{r}_i ($i=1,3$)의 경우

$$\begin{aligned} u(\bar{x}_P) &= u(\bar{x}_Q) \\ v(\bar{x}_P) &= v(\bar{x}_Q) \\ w(\bar{x}_P) + r_{ix} \frac{\Delta \hat{w}}{\Delta x} &= w(\bar{x}_Q) \quad (i=1,3) \end{aligned} \quad (7)$$

4. 해석 결과 및 고찰

본 절에서는 8 매 주자직 직물 복합재료의 섬유 다발의 층에 대한 위상차 및 적층수 그리고 섬유 굴곡도에 따른 면내와 면외의 등가물성치의 변화에 대해 고찰하였다.

데이터의 양이 비교적 많은 3 장과 4 장에 대한

값들은 평균값에 대해서 표시하였다. 그리고 평균값에 대한 각 위상차를 주었을 경우에 대해 표준편차를 구한 후 그것을 다시 평균으로 나눈 값인 CV 로서 평균화시킨 후 각각 위상차에 대한 결과들을 비교하였다.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100(\%) \quad (8)$$

여기서 μ 는 평균을 의미하고 σ 는 표준편차를 나타낸다. 표 1에서는 각각의 섬유 굴곡도를 가진 요소에 대해 나타나는 등가물성치의 값들을 각 성분별로 적층수에 따른 평균치와 CV 를 나타내고 있다. 먼저 각 성분들의 적층수에 따른 값들의 변화를 살펴보았을 때 E_{xx} 의 하중조건을 주었을 때 발생하는 E_{xx} , v_{xy} 의 값이 현저하게 변화하는 것을 확인 할 수 있다.

이렇게 두 값이 다른 값들에 비해 크게 변하는 이유는 여러 가지로 생각되어질 수 있지만 적층의 영향만을 고려하여 본다면 이는 자유경계면 효과의 영향으로 생각되어질 수 있다.[5]

v_{xz} 의 경우 이론상 이러한 효과에 의해 상단과 하단의 변형이 줄기 때문에 상대적으로 값이 작아지게 되는 것이다. 여기서 섬유 굴곡도에 따른 변화를 살펴볼 수가 있는데 전체적인 값들의 변화 정도는 굴곡도가 3.25:1 인 것과 6.4:1 인 것이 거의 동일한 형태로 값의 변화를 보였고, 다른 값들에 비해 E_{xx} 의 값이 굴곡도가 감소하면서 많이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 이에 반해 γ_{xz} 의 값은 감소하였다. 우선 E_{xx} 의 증가는 섬유 굴곡이 심하지 않아 자유경계면 효과가 줄었기 때문이라 판단되며 이로 인해 변형이 줄고 E_{xx} 의 수치가 전체적으로 높게 나타난 것이라 할 수 있다.

G_{xz} 의 값이 작아지는 이유는 섬유굴곡도가 작아진다는 것은 섬유가 교차되는 부분의 각이 작아진다는 것을 의미하고 각이 작아지면 상대적으로 전단에 대해 잘 견디지 못하기 때문에 굴곡도가 작아지면 G_{xz} 의 값이 작아지게 되는 것이다.

표 1의 CV 값 부분을 보게 되면 E_{xx} 를 제외한 거의 모든 성분들의 CV 값들이 대단히 작음을 알 수 있다. 이는 E_{xx} 에 비해서 다른 성분들이 섬유 다발의 적층의 층간 위상차에 대한 값의 변화가 적다는 것을 의미한다. 면외 방향 성분 중 하나인 E_{zz} 의 경우 적층수의 증가에 따른 값의 변화가 매우 적었고 또한 위상차에 대한 CV 값과 섬유 굴곡도 변화에 따른 값들이 매우 작은 변화를 가졌다.

그림 3과 그림 4는 두개의 인접한 층을 가진 경우 E_{xx} 와 E_{zz} 에 대한 위상차에 따른 값의 변화를 나타낸 도표이다. v_{xz} , v_{xy} 의 경우 두 가지로 표현되었는데 E_{xx} , E_{zz} 의 두 가지 경우에 대해서 E_{xx} 의 경우는 두께방향의 반복조건을 주지 않아 유한한 경계를 가지는 경우이고 E_{zz} 의 경우 하중조건을 주기 위해 두께방향으로 무한하게 경계조건을

준 경우이다.

Table 1 Mean and CV of effective properties for 8 harness satin weave (CV : Coefficient of variation)

Waviness		1 / 3.25		1 / 6.4	
Value		Mean (Gpa)	C.V.(%)	Mean (Gpa)	C.V.(%)
E_{xx}	1	52.32115	-	56.78917	-
	2	56.36498	1.51633	62.31852	1.30987
	3	57.11164	1.04906	63.31471	0.79363
	4	57.42600	0.85100	63.55726	0.57593
E_{zz}	1	14.58924	-	14.73046	-
	2	14.60200	0.03418	14.73875	0.02299
	3	14.60322	0.02070	14.75010	0.01575
	4	14.62066	0.01705	14.75298	0.01198
G_{xy}	1	6.40209	-	6.61006	-
	2	6.43276	0.03483	6.63260	0.02067
	3	6.44346	0.03357	6.71036	0.03035
	4	6.44923	0.03112	6.72378	0.03250
G_{xz}	1	5.16072	-	5.08167	-
	2	5.29969	0.87923	5.17158	0.64255
	3	5.36993	0.36876	5.19922	0.41399
	4	5.40105	0.48633	5.20467	0.34872
ν_{xy} (E_{xx})	1	0.12420	-	0.11870	-
	2	0.08709	7.83656	0.07015	9.38915
	3	0.08077	6.04473	0.06376	6.28913
	4	0.07810	5.21614	0.06162	4.81735
ν_{xy} (E_{zz})	1	0.11472	-	0.10096	-
	2	0.11400	0.34540	0.10039	0.40450
	3	0.11413	0.21969	0.09801	0.28203
	4	0.11255	0.17367	0.09820	0.22169
ν_{xz} (E_{xx})	1	-	-	0.41161	-
	2	-	-	0.43599	0.74676
	3	-	-	0.43867	0.46197
	4	-	-	0.43936	0.34583
ν_{xz} (E_{zz})	1	0.11706	-	0.10287	-
	2	0.11619	0.34367	0.10226	0.40896
	3	0.11612	0.21867	0.10231	0.30374
	4	0.11628	0.17823	0.10222	0.23663

두 값들을 비교해보았을 때 무한경계조건을 준 경우가 값이 대체적으로 크게 나옴을 확인 할 수 있었고 CV 값이 적게 나오는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과를 갖게 되는 이유는 무한한 경계조건을 줌으로 인해 섬유 배열에 대한 균일도가 증가하여 위상차에 대한 영향이 많이 줄어들기 때문이다.

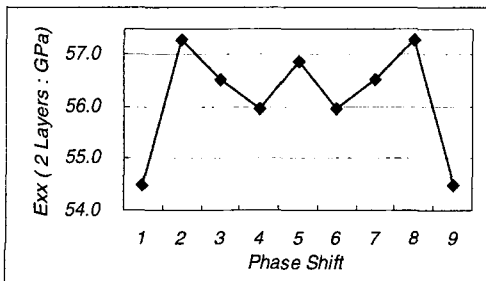


Fig 3 Variation of E_{xx} for two layers 8 harness

satin weave composites

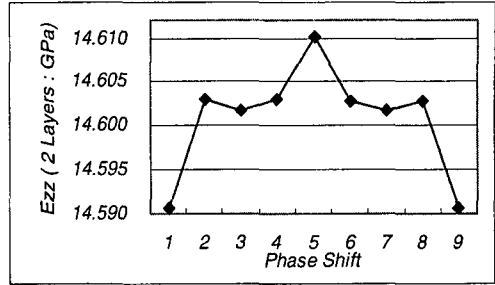


Fig 4 Variation of E_{zz} for two layers 8 harness satin weave composites

그리고 ν_{xy} 의 값이 유한한 조건의 경우에 크게 나타난 것은 한정된 층의 반발력이 무한하게 적용된 경우의 섬유의 반발력에 비해 작아 두께방향과 Y-방향의 변형이 더 자유롭게 일어날 수 있기 때문에 크게 나타났다고 볼 수 있다.

Table 2 Minimum and maximum values of poisson's ratio for 8 harness satin weave composites

Property		Minimum	Phase shift	Maximum	Phase shift
ν_{xy} (E_{xx})	2	0.08184	0, 1	0.10313	0, 0
	3	0.07389	0, 3, 2	0.09844	0, 0, 0
	1/3.25	0.07090	0, 3, 6, 5	0.09650	0, 0, 0, 0
	4	0.06501	0, 3	0.08547	0, 0
ν_{xy} (E_{zz})	2	0.05905	0, 3, 6	0.07961	0, 0, 0
	3	0.05905	0, 3, 6	0.07961	0, 0, 0
	1/6.4	0.05691	0, 5, 2, 3	0.07729	0, 0, 0, 0

표 2에서는 가장 큰 CV 값을 가진 ν_{xy} 의 위상차에 따른 최대, 최소 값을 나타내었다. 표 2에서 위상차는 전체 마크로요소 8 개에 대한 위상의 변화로서 나타내었다. 위상차 부분에 나타내어져 있는 숫자는 전체 8 번의 위상변화에 대해 행하여진 이동된 양이다. 결과를 살펴보았을 때 최대값이 나타나는 경우는 모두 위상의 변화를 주지 않은 동일하게 적용된 경우에서 나타남을 알 수 있었다. 이러한 결과는 위상차가 없는 경우 경사와 위사간의 반발력이 가장 심해 재료의 변형이 많이 작아지기 때문이다. 최대값에서 규칙성을 띠는 반면 최소값을 가지는 경우는 정확한 규칙성을 띠지 못했다. 이것은 위상차를 8 번에 국한되게 주어줌으로서 위상의 변화에 대해 민감도를 측정할 수는 있었으나 정확한 규칙성을 찾기 위해서는 더 세분한 위상차를 주어야 하기 때문이다.

온도변화에 대한 열팽창계수에 대한 예측은 5 차 단일 변위장 요소를 사용하여 절점수 증가와 계산시간 지연에 대한 문제로 인해 위상차가 없는 경우와 위상이 변하여 최소값을 갖는 경우에 대해 나타내었다. 표 3은 온도변화에 대한 열팽창계수

들을 보여주고 있다.

Table 3 CTE values for 8 harness satin weave composites

Layer	Phase shift	α_1	α_2	α_3
1		7.34E-06	7.87E-06	6.37E-05
2	dx=0	7.21E-06	7.62E-06	6.35E-05
	dx=a	7.13E-06	7.42E-06	6.36E-05
3	dx=0	7.24E-06	7.60E-06	6.31E-05
	dx=a	7.19E-06	7.46E-06	6.32E-05

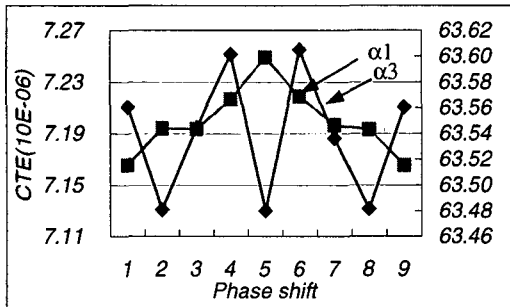


Fig 5 Variation of CTE for two-layers 8 harness satin weave composites

표 3 에서 a 는 4 이다. 가장 많은 층 간 위상차를 가질 때가 이 경우이다. 즉, 적층된 요소들의 가장 틀린 형태를 가질 때 최대, 최소의 수치를 가진다고 말할 수 있으며 이러한 최대, 최소의 값은 α_1 , α_2 모두 동일한 위상차에서 최대값을 가졌으며 최소값도 마찬가지이다. 또한 α_3 의 경우 값이 현저하게 컸으며 층수가 증가함에 따라 감소하였고 최대, 최소값의 차이가 적었으며 최대, 최소값의 변화가 α_1 , α_2 의 경우와 반대로 나타났다.

먼저 α_1 , α_2 는 8 매 주자직 재료가 XY 에 대해 대칭이므로 비슷한 형태로 나타난다고 볼 수 있으며 4 번의 위상변화가 작은 값을 가지는 이유는 매트릭스(Resin)의 열팽창계수가 크기 때문에 매트릭스의 변형이 가장 자유로운 4 번의 위상차에 대해 가장 큰 값을 보인 것으로 간주된다.

5. 결론

면외 방향 등가물성치 E_{zz} , ν_{xz} 등은 위상차의 변화와 적층의 층 수에 대해 면내성분에 비해 민감하게 반응하지 않음을 알 수 있었다. G_{xz} 는 G_{xy} 보다 위상차에 대해 영향을 많이 받았으며 섬유 굴곡도 변화에서는 G_{xz} 만이 굴곡도가 줄었을 때 모든 성분들이 값이 증가하는 것에 반해 감소하는 특징적인 변화를 가짐을 알 수 있었다.

열팽창계수에 대한 고찰로 섬유다발의 위상차가 가장 많이 변화되었을 때 그 값들이 두드러지게 변화하는 것을 도표를 통해 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 국방과학 연구소 기초연구(ADD-00-5-4)사업의 일환으로 진행되었으며, 이에 도움을 주신 여러분들께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 우경식, 서영욱 “섬유다발 배열 및 적층수에 따른 평직복합재료 등가물성치의 변화에 대한 통계적 연구”
- (2) 우경식, 서영욱 “기하학적 매개변수에 의한 평직 복합재료의 저 균일도 문제”
- (3) Woo, K. and Whitcomb, J.D., “Effects of Fiber Tow Misalignment on the Engineering Properties of Plain Weave Textile Composites”, Composite Structures, Vol.37(3/4), 1997, pp.343-355.
- (4) Woo, K. and Whitcomb, J.D., “Macro Finite Element Using Subdomain Integration”, Numerical Method in Engineering, Vol.9, 1993, pp.937-949.
- (5) Whitcomb, J.D., Kondagunta, G. and Woo, k., “Boundary Effects in Woven Composites”, Journal of Composite Materials, Vol.29(4), 1995, pp.507-524.
- (6) Pierce, F. T., “Geometrical principles applicable to the design of functional fabrics”, Textile Research Journal, Vol.17, No.7, 1947, pp.123-147
- (7) N.K. Naik and P.S. Shemvekar, “Elastic behavior of woven fabric composites: III-Laminate design”, Journal of Composite Materials, Vol.26, No.17, 1992, pp.2522-2241.
- (8) T.M. McBride and Julie Chen, “Unit-cell geometry in plain-weave fabrics during shear deformations”, Composites Science and Technology, Vol.57, 1997, pp.345-351.