

주자직 복합재료 미세구조의 응력 및 파괴해석

Effects of Microstructural Arrangement on the Stress and Failure Behavior for Satin Weave Composites

우 경 식*

서 영 욱**

Woo, Kyeongsik

Suh, Young-Wook

(논문접수일 : 2000년 11월 21일 ; 심사종료일 : 2001년 10월 29일)

요 지

본 논문에서는 일축인장하중을 받고 있는 8-매 주자직 복합재료의 적층 위상변화가 등가물성치 및 응력분포에 미치는 영향을 연구하였다. 등가물성치 및 응력은 임의의 배열을 갖는 적층 구조물에 대한 단위구조 해석을 통해 계산하였으며, 마크로요소를 사용하여 효율적인 계산을 수행하였다. 계산 결과, 섬유다발 미세구조의 변화는 응력분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 섬유다발 및 수지에서의 응력은 섬유다발의 이동에 따라 서로 다른 분포를 보였고, 수지영역에서의 최대응력은 매우 넓은 범위에 걸쳐 분포하였다.

핵심용어 : 8-매 주자직 복합재료, 단위구조 해석, 마크로요소

Abstract

In this study, the stacking phase shift effect on the effective property and stress distribution was investigated for 8-harness satin weave textile composites under uni-axial tension. Textile configurations with varied phase shifts were modeled by unit cells and repeating boundary conditions were applied at the outer periodic surfaces. The effective property and stress were calculated by the unit cell analysis using macro-element to reduce the computational resource. It was found that stresses were dependent on the variation of tow arrangement of adjacent layers. The in-phase and the shifted configurations showed large differences in the stress distribution pattern. The stress level was very high in the resin region and the distribution of the maximum stresses was widely scattered.

Keywords : 8-harness satin weave textile composites, unit cell analysis, macro-element

1. 서 론

직물복합재료(woven textile composites)는 섬유다발의 꼬임에 의해 강화된 구조용 재료의 하나이다. 직물복합재료는 섬유다발들의 직조형태에 따라 평직, 능직, 주자직 등으로 그 종류가 세분화된다.¹⁾ 한 예로 그림 1에서는 8-매 주자직 복합재료의 전형적인 미세구조를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 8-매 주

자직 복합재료는 경사(warp tow)와 위사(fill tow)가 일정한 간격으로 교차하여 꼬여 있고 그 사이에는 수지가 채워져 있다. 이와 같은 직조구조는 직물복합재료의 몇 가지 특성을 강화시켜, 면의 방향으로의 충격 저항성 및 복잡한 모양으로의 성형성 등에 있어 전통적인 일방향 적층 복합재료(tape laminate)에 비해 우수한 특성을 제공한다.

직물복합재료의 미세구조는 섬유다발의 단면 및 중

* 정회원 · 충북대학교 구조시스템공학과, 부교수

** 충북대학교 구조시스템공학과, 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 3월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

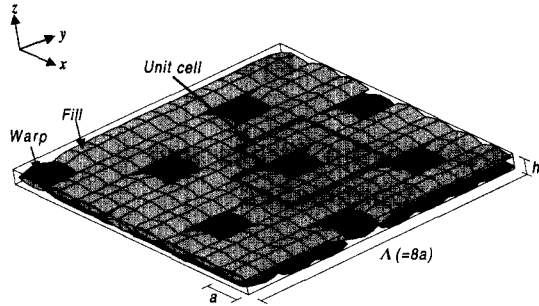


그림 1 Tow architecture of 8-harness satin weave composite

심선, 섬유다발사이의 갭(gap) 등과 같은 기하학적 매개변수로 정의될 수 있는데, 이들은 모두 라미나(lamina) 수준의 매개변수²⁾에 포함된다. 한편, 적층재(laminate) 수준의 매개변수로는 인접한 섬유다발사이의 위상차(phase shift)를 예로 들 수 있다. 직물 복합재료가 적층 될 때 각 층은 단순 또는 대칭으로 적층 될 수도 있으나, 보통은 임의로 적층 되어 각 층의 섬유다발 간에 위상차가 발생하게 된다. 이처럼 위상차는 적층 구조물에서만 나타나는 매개변수 이므로 적층재 수준의 매개변수로 정의된다.

한편 직물복합재료는 복잡한 3차원 구조물로 상세 모델링을 통해 3-D 유한요소 해석을 수행하는 경우 매우 큰 전산자원이 요구된다. 특히, 앞에서 언급한 여러 가지 기하학적 매개변수는 직물복합재료의 해석뿐만 아니라 모델링 자체를 어렵게 하는 요인이 된다. 이러한 이유로 기존의 연구들은 직물복합재료의 등가물성치를 예상하는 것이 대부분이었고,^{3)~9)} 몇몇 연구들만이 미세구조적 관점에서 상세 응력분포를 예상한 정도이다. Avey⁵⁾는 2-D 8-매 주자직에 대한 위상변화의 효과를 연구하였고, Foy⁶⁾와 Whitcomb 등⁷⁾은 특수 유한요소를 사용하여 등가물성치를 계산하였다. 8-매 주자직 복합재료에 대한 상세 3-D 유한요소 해석은 Chapman¹⁰⁾에 의해 연구된 바 있다. 그러나 이들 연구는 일부의 적층 형태에 대해서만 수행된 정도이다.

본 연구에서는 8-매 주자직 복합재료의 위상차에 의한 미세구조의 배열변화가 등가물성치 및 응력분포에 미치는 영향을 조사하였다. 먼저, 섬유다발이 위상차를 갖도록 단위구조를 모델링 한 후, 반복되는 경계면에 반복 경계조건을 가하였다. 등가물성치를 계산하기 위해 일축인장시험을 수치적으로 모사하였고, 상세응력의 계산에는 후처리기법¹¹⁾을 사용하였다. 결과에서는

섬유다발의 위상차와 적층수 변화에 따른 등가물성치의 통계치 및 분포변화를 조사하였고, 또한 두 장이 적층 된 8-매 주자직 복합재료 구조물에서 섬유다발 구성재료 각각에 대한 최대응력 분포 및 분산성 등을 고찰하였다.

2. 해 석

2.1 단위구조 모델링

그림 1에 보인 바와 같이 8-매 주자직 복합재료 전체는 하나의 기본 구조 단위를 반복하여 얻어진다. 이 반복되는 최소의 기본 단위구조를 사용하여 구조물을 해석하는 경우 이를 단위구조 해석이라 한다. 여기서 단위구조는 기하학적 형상의 반복성 뿐만 아니라 경계 및 하중조건을 반복성까지 포함한다.

그림 2는 8-매 주자직 복합재료의 한 층에 대한 단위구조를 보이고 있다. 그림에 보인 바와 같이 이 단위구조는 반복벡터 $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3$ 로 정의할 수 있다.

$$\vec{r}_1 = a(\hat{i} - 3\hat{j}), \vec{r}_2 = a(3\hat{i} - \hat{j}), \vec{r}_3 = 2a(\hat{i} - \hat{j}) \quad (1)$$

여기서 a 는 섬유다발의 폭을 의미한다. 한편 반복벡터들 사이에 $\vec{r}_3 = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ 의 관계식이 성립하므로 실제로 단위구조를 정의하는 데는 오직 두 개의 벡터만이 필요하다. 만약, 한 점 P 가 z -축에 직각인 바깥 경계면에 위치한다면, 반복되는 경계면에는 이에 대응하는 점 Q 가 반드시 존재해야 하고, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{x}_p + \vec{r}_a = \vec{x}_q \quad (a=1, 2, \text{ or } 3) \quad (2)$$

반복벡터를 이용하면 반복경계면은 3개의 영역으로 구분되고, 이들 각각에 대한 반복경계조건이 유도된다.

본 연구에서는 등가물성치를 계산하기 위해 단위구조의 x -축 방향으로 ϵ_0 만큼의 변형률을 부가하여 인장 시험을 수치적으로 모사하였고, 이 때 단위구조에는 다음과 같은 경계조건이 가하여 진다.

$$\begin{aligned} u(\vec{x}_p) + \epsilon_0 r_{a1} &= u(\vec{x}_q) \\ \nu(\vec{x}_p) - \bar{\nu}_{xy} \epsilon_0 r_{a2} &= \nu(\vec{x}_q) \\ w(\vec{x}_p) &= w(\vec{x}_q) \end{aligned} \quad (3)$$

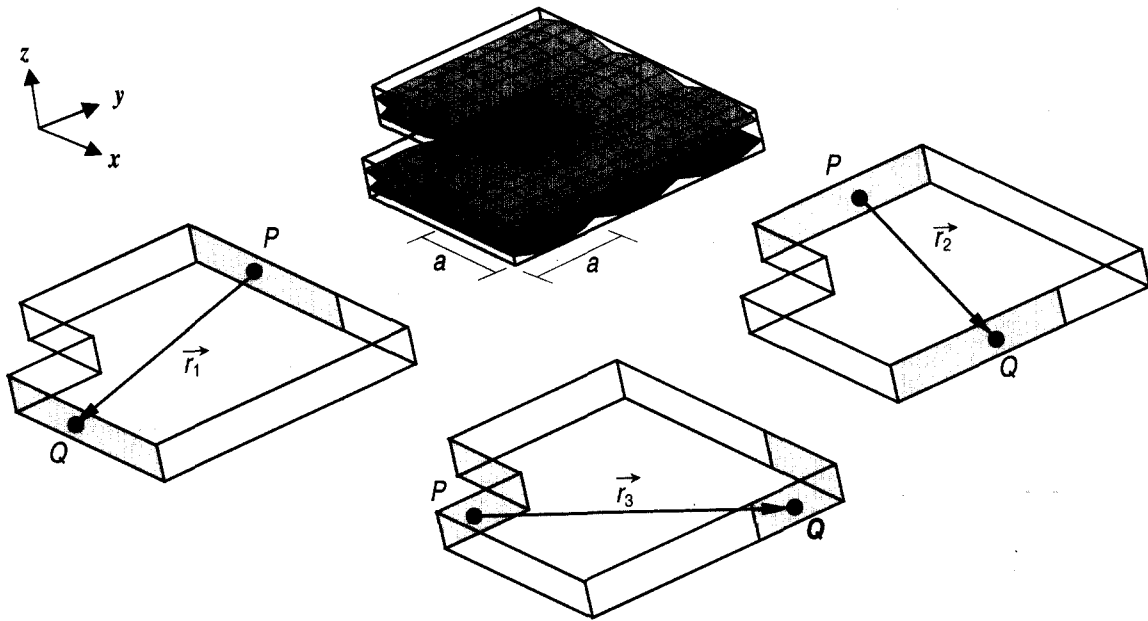


그림 2 Unit cell and periodicity vectors

여기서 r_{a1}, r_{a2} 는 각각 \vec{r}_a 의 x - 및 y -방향의 성분이다.

8-매 주자직은 한 면을 차지하는 섬유다발의 비에 따라 경사면(warp face)과 위사면(fill face)으로 구분할 수 있다. 한 예로, 그림 1에서 상단면은 위사다발의 구성비가 크므로 위사면에 해당된다. 구조물이 적층될 때 각 층은 서로 같은 면(i.e., 위사면/위사면, 경사면/경사면)이 접할 수도 있고, 혹은 서로 다른 면(i.e., 경사면/위사면, 위사면/경사면)이 마주하도록 적층될 수도 있다. 본 논문에서는 후자에 해당하는 적층형상을 고려하였는데, 이 경우 식(1)의 반복벡터는 섬유다발의 위상변화에 관계없이 성립하게 된다. 한편, 서로 동일한 면이 접하여 적층된 구조물의 경우 단위구조는 x - 및 y - 방향으로 각각 섬유다발의 한 주기에 해당하는 지역을 포함하므로, 이 때 반복벡터는 다음과 같은 두 개의 벡터로 정의된다.

$$\vec{r}_1 = 8a\hat{i}, \quad \vec{r}_2 = 8a\hat{j} \tag{4}$$

만약, 서로 다른 면이 접하도록 적층되었고 각 층을 구성하는 섬유다발의 굴곡형태가 모두 동일한 구조물에서, 섬유다발의 이동이 없다면 그 구조물은 완전 단 순적층이 된다. 그러나 이 경우 섬유다발의 굴곡형태가

모두 동일하므로 완전 대칭적층은 발생하지 않는다.

본 연구에서는 8-매 주자직 복합재료가 적층될 때 면내 위상차가 발생한다고 가정하였다. 또한 섬유다발의 단면형태는 볼록렌즈(lenticular) 형태이고, 굴곡된 부분에 대한 섬유다발의 중심선은 사인곡선의 형태를 갖는다고 가정하였다. 이는 모든 층에 대해 동일하며 다음의 식으로 정의된다.

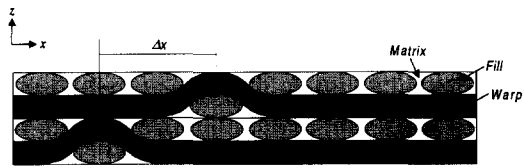
$$z_c(x) = \frac{h}{4} \sin\left(\frac{\pi x}{a} + \Delta x\right) \tag{5}$$

여기서, h 와 a 는 각각 한 층의 두께와 섬유다발의 폭을 의미한다. 섬유다발의 굴곡도는 다음의 식으로 정의된다.

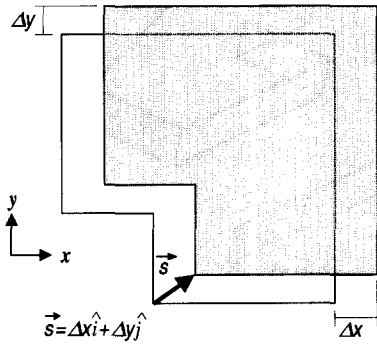
$$WR = h/2a \tag{6}$$

식(6)에서 굴곡도는 오직 섬유다발의 굴곡영역만을 고려한 값으로, 본 연구에서는 1/3으로 가정하였다.

그림 3은 8-매 주자직 복합재료에 대한 위상차의 정의를 나타내고 있다. 그림 3(a)는 개략적인 단면을 보인 것으로, 이 그림에서 두 번째 층은 첫 번째 층에 비해 x -축 방향으로 Δx 만큼 이동하였다. 본 연구에서는



(a) Cross-sectional view



(b) Top view

그림 3 Fiber tow phase shift

x- 및 y-방향으로의 위상변화를 고려하였고, 이 형태를 그림 3(b)에서 보여주고 있다. 이 때 이동벡터는 다음과 같이 정의된다.

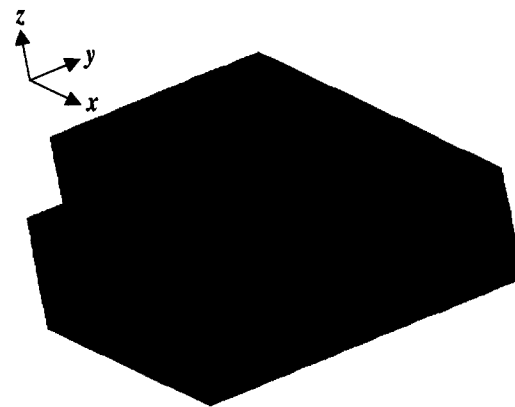
$$\vec{s} = \Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j} \quad (7)$$

위 식의 변위벡터가 반복벡터 중의 하나와 일치한다면, 그 구조물은 위상차가 발생하기 전과 동일한 형태가 된다. 즉, 변위량 Δx 와 Δy 에 대한 제약조건은 반복벡터에 의해 주어진다.

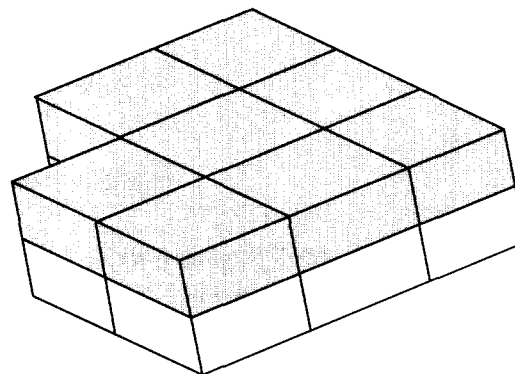
2.2 매크로요소와 부메쉬

직물복합재료의 상세해석 시, 전통유한요소 해석법을 사용하는 경우에는 거대한 전산용량이 요구된다. 특히, 비교적 큰 단위구조를 갖는 8-매 주자직 복합재료가 여러 장 적층되어 있는 경우라면 전통유한요소법을 사용하는 것은 매우 비효율적인 일이다. 본 연구에서는 8-매 주자직 복합재료 구조물의 물성치 및 국부응력 계산 시 요구되는 전산자원을 줄이기 위해 다중변위장 매크로요소^{7),8)}를 사용하였다.

그림 4는 2장이 적층된 8-매 주자직 복합재료의 단위구조에 대한 전통적인 메쉬와 매크로요소 메쉬를



(a) Conventional (NE=12000, 20-node hex)



(b) Macro-element mesh (NE=16, quintic)

그림 4 Conventional and macroelement meshes for two-layer 8-harness satin weave configuration, The upper layer shifted by $x=0.2a$, $y=2.2a$

보이고 있다. 이 그림에서 두 번째 층은 $\Delta x=0.2a$, $\Delta y=2.2a$ 의 위상변화를 갖는다. 여기서 전통적인 메쉬는 12,000개의 요소로 모델 되었다. 반면, 이와 동일한 단위구조 모델은 그림 4(b)에 보인 바와 같은 16개의 매크로요소로 정의된다. 본 연구에서는 각 층에 대해 하나의 매크로요소가 폭이 a 인 하나의 섬유다발 영역을 담당하도록 모델링 하였다. 즉, 매크로요소 하나의 폭은 a , 높이는 h 로 정의된다. 각각의 매크로요소에 대한 미세구조는 해당 부메쉬가 담당하게 된다. 그림 5는 그림 4에서 보인 매크로요소 각각에 해당하는 부메쉬를 보이고 있다. 각각의 부메쉬는 전통적인 메쉬와 동일하게 모델링 된다. 실제 해석에서는 첫 번째 층에 대한 부메쉬는 일정하게 고정하였다.

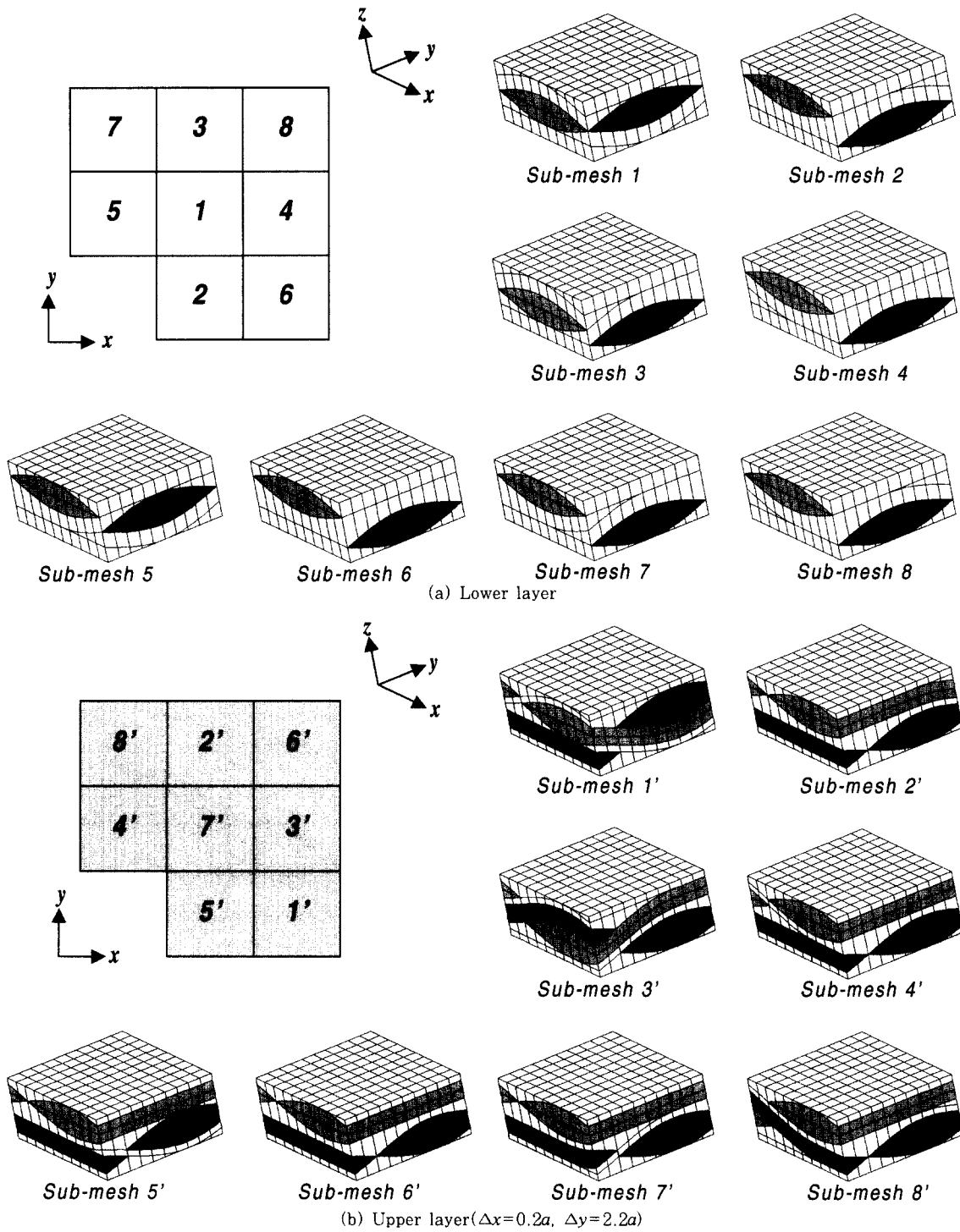


그림 5 Sub-meshes for two-layer 8-harness satin weave configuration

2.3 재료의 특성

주자직 복합재료 단위구조는 섬유다발과 수지로 구성되어 있고, 섬유다발은 다시 섬유와 수지로 구성된다. 표 1은 본 계산에 사용된 섬유다발과 수지에 대한 물성치를 보이고 있다.¹⁰⁾

여기서, E 는 탄성계수(Young's modulus), ν 는 포아송 비, G 는 전단계수를 의미하며, X, Y, Z 는 각각 $x-, y-$ 및 $z-$ 방향의 강도를, 그리고 S 는 전단강도를 의미한다.

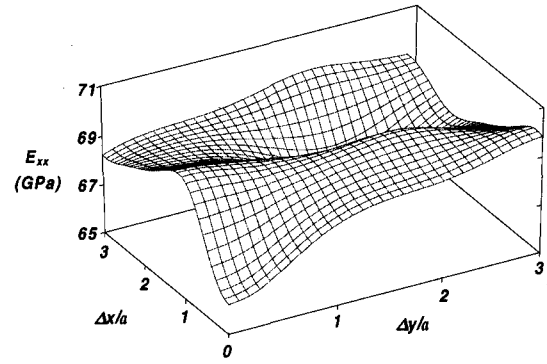
표 1 Material properties for fiber tow and matrix (Carbon/Carbon)¹⁰⁾

| | Properties | Values |
|-----------|---------------------|----------|
| Fiber Tow | E_{11} | 273GPa |
| | $E_{22}=E_{33}$ | 7.65GPa |
| | $G_{12}=G_{13}$ | 5.37GPa |
| | G_{23} | 3.03GPa |
| | $\nu_{12}=\nu_{13}$ | 0.231 |
| | ν_{23} | 0.244 |
| | X | 3450MPa |
| | $Y=Z$ | 65.3MPa |
| | $S_{12}=S_{13}$ | 34.5MPa |
| Matrix | E | 9.17GPa |
| | ν | 0.11 |
| | X | 38.5MPa |
| | S | 20.19MPa |

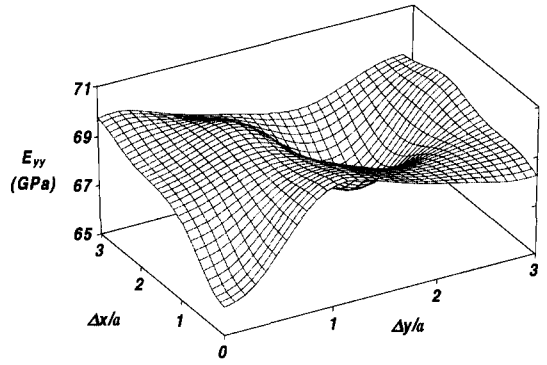
3. 계산결과 및 고찰

본 절에서는 8-매 주자직 복합재료의 섬유다발의 이동에 따른 등가물성치 및 응력의 변화를 설명하였다. 섬유다발의 면내 위상변화를 고려하여, 적층수를 2에서 8까지 변화시켜 각 모델에 대한 등가물성치의 통계치 및 빈도분포를 조사하였다. 응력조사는 2장이 적층된 단위구조에 대해 수행하였으며, 단위구조를 구성하는 섬유다발 각각에 대한 응력분포를 비교하였다.

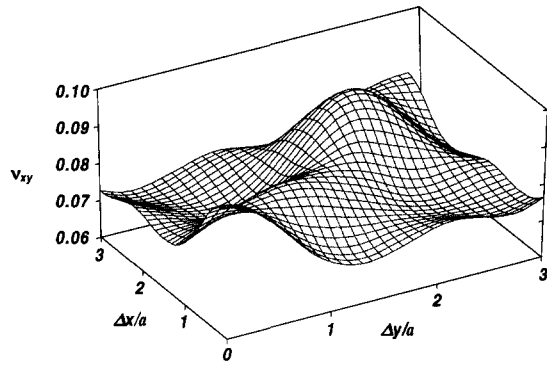
그림 6은 2장이 적층된 8-매 주자직 복합재료에 있어 두 번째 층의 이동에 따른 등가물성치의 변화를 보인 것이다. 참고문헌 [9]에 보인 평직복합재료와 마찬가지로 8-매 주자직의 등가물성치 역시 섬유다발의



(a) E_{xx}



(b) E_{yy}



(c) ν_{xy}

그림 6 Variation of effective properties for two-layer 8-harness satin weave composites

이동 따라 변화하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 평직에 비해 변화정도는 작게 나타났다. 그림 6(a)에서 E_{xx} 는 섬유다발의 이동 없이 완전 단순적층 되었을 때 최소값을 그리고, $a < \Delta x < 1.2a, \Delta y=0$ 에서 최대값을 보였다. 그림 6(b)는 E_{yy} 의 변화를 보인 것으로, 이는

그림 6(a)에서 x-축과 y-축에 대응하는 값을 서로 바꾼 것과 동일한 분포를 나타내었다. 한편, 그림 6(c)에서 섬유다발의 이동에 따른 ν_{xy} 는 E_{xx} 및 E_{yy} 에 비해 복잡하게 변화하는 것을 볼 수 있었다.

이상의 결과는 섬유다발의 형태 및 내부구조의 상호 작용으로부터 이해할 수 있다. 우선, 8-매 주자직 복합재료의 섬유다발 형태를 보면 섬유다발 한 주기의 1/4만이 굴곡 되어 있다. 이는 평직복합재료에 비해 매우 작은 영역에 해당하는데, 직물복합재료의 경우에는 이 굴곡영역이 구조물 변형에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 8-매 주자직의 경우 굴곡영역의 변형이 전체 구조물에 미치는 영향이 평직에 비해 작으므로, 섬유다발의 이동에 따른 등가물성치의 변화가 상대적으로 작게 나타나는 것이다.

그림 7(a)는 단순 적층 된 8-매 주자직 복합재료에 대한 마크로요소의 변형 된 형태를 보이고 있다. 단위 구조에 x-방향으로 인장변형률이 가해지면, 굴곡 된 경사 다발은 퍼지려고 하여 화살표로 표시된 것과 같은 인장-전단 커플링 변형(extension-shearing coupling deformation)이 발생하게 된다. 섬유다발이 위상차 없이 배열되었을 때는 두 층에서의 인장-전단 커플링 변형이 동일한 방향으로 발생하기 때문에 층간 섬유다발의 상호 간섭은 매우 작다. 따라서 섬유다발이 교차하는 굴곡부분에서 전단 변형이 크게 발생하고 결과적으로 E_{xx} 값은 최소가 된다. 그림 7(b)는 두 번째 층이 $\Delta x = a$ 만큼 이동하였을 때의 변형을 보인 것으로, 이때는 층간 인장-전단 커플링 변형이 서로 반대방향으로 작용하게 된다. 따라서 전체 구조물의 변형은 감소하고 결과적으로 E_{xx} 값은 증가하게 된다. 한편 ν_{xy} 가 복잡한 변화를 보인 것은, 그 정의에서도 알 수 있듯이, E_{xx} 와 E_{yy} 의 영향을 동시에 받기 때문으로 생각된다.

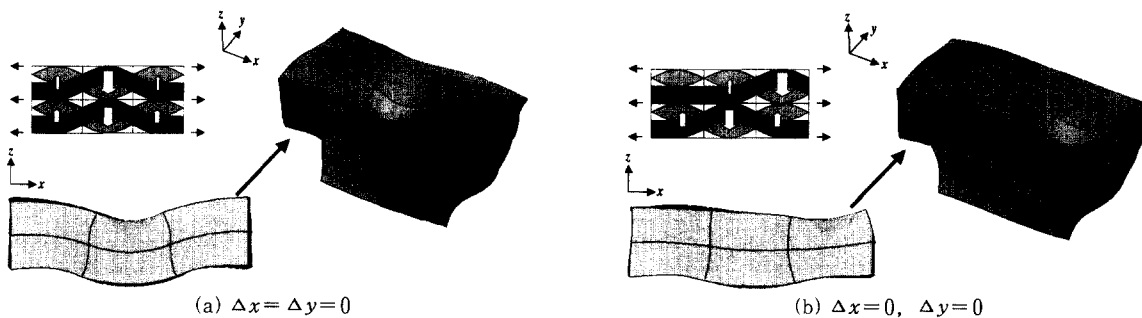


그림 7 Deformed shape of two-layer 8-harness satin weave textile unit cell models under a uni-axial load

그림 8은 적층수 변화에 따른 E_{xx} 및 ν_{xy} 의 빈도분포를 보이고 있다. 이 분포도는 적층수가 서로 다른 각각의 모델에 대해, 물성치의 변화구간을 동일하게 조정 한 히스토그램 막대의 중간점을 연결한 것으로 비교를 쉽게 하기위해 동일한 그림에 나타내었다. 이 때 통계 처리에 사용된 표본은 적층수에 관계없이 2,048개로 일정하게 유지하였다. 이 그림에서 E_{xx} 와 ν_{xy} 는 적층수가 증가할수록 분포의 폭이 감소하여 평직복합재료의 결과⁹⁾와 유사한 경향을 보였다. 그러나 동일한 적층수의 평직복합재료 결과⁹⁾와 비교했을 때, 값의 발생 범위가 작게 나타나 평직에 비해 상대적으로 높은 균일도를 갖는다는 것을 알 수 있었다.

그림 9는 적층수에 따른 등가물성치의 최대, 최소, 평균값의 변화를 보이고 있다. 그림 9(a)에서 E_{xx} 의 평균값은 적층수가 적을 때는 변화율이 컸으나 적층수가 증가할수록 그 변화율은 감소하여 일정한 값으로 수렴하였다. 최대, 최소값도 평균값과 유사한 변화를 보였다. 그림 9(b)에 보인 ν_{xy} 의 평균값은 적층수가 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 E_{xx} 와 마찬가지로 변화율은 점차 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다.

한편, 본 연구에서는 상세응력을 계산하기 위해 x-방향으로 인장하중을 가하였다. 이 때 단위구조에 부가된 명목응력(nominal stress)은 위상차 없이 적층된 단위구조의 인장계수에 0.1%의 변형률을 곱한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_o = 0.1\% \times E_{xx, \Delta x \Delta y = 0} \tag{8}$$

그림 10은 위상변화가 없는 경우와 x-방향으로 a만큼의 위상변화를 갖는 8-매 주자직 복합재료에 대한

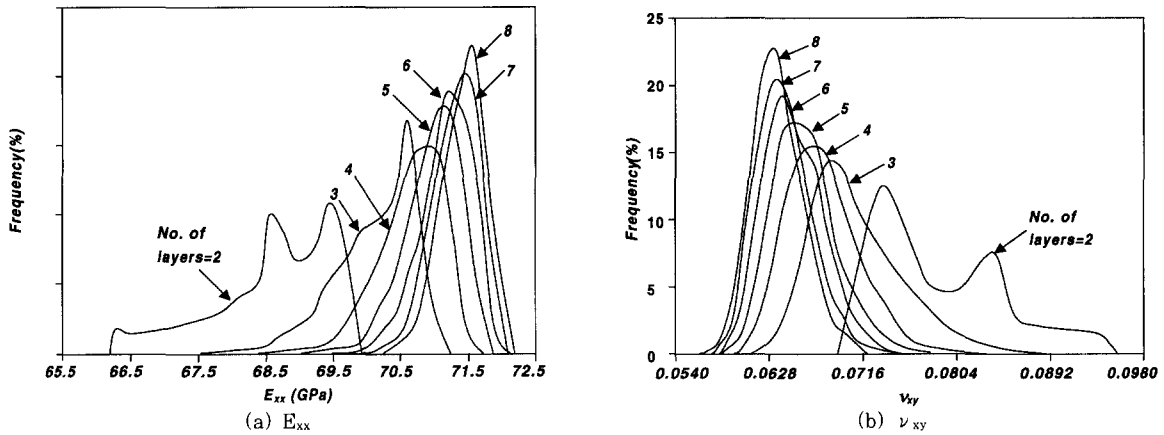


그림 8 Distribution of effective elastic properties for 8-harness satin weave versus number of layers

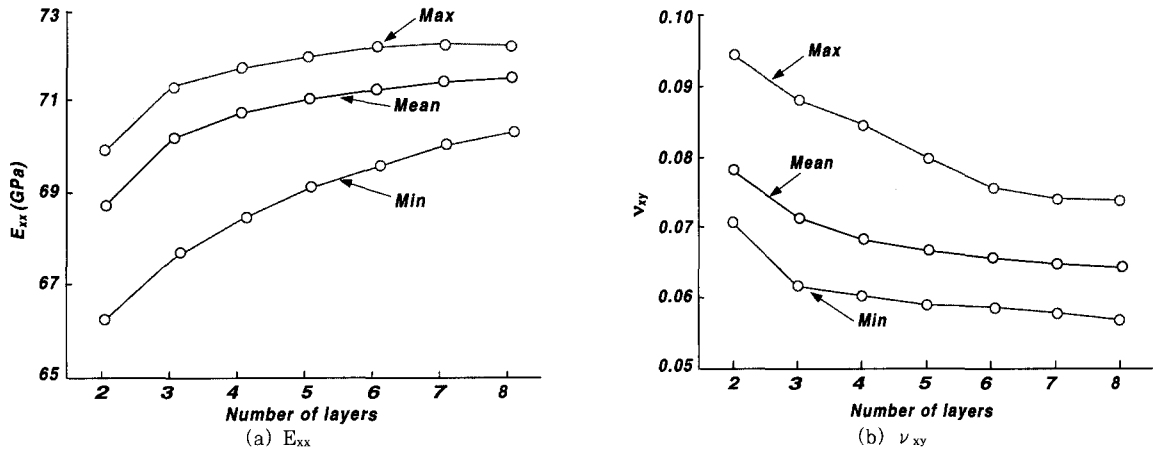


그림 9 Variation of maximum, minimum and mean values of effective properties versus number of layers

응력 분포도를 나타내고 있다. 여기서 나타낸 응력값은 모두 물성축으로 변환된 후 다시 강도로 나눈 값들이다. 즉, 이들 값은 최대응력 파괴이론¹⁰⁾에 의한 파괴지표를 의미한다. 이 그림에서는 첫 번째 층에 대한 응력 분포도만을 나타내고 있다. 그림 10(a)에서 보인 바와 같이, 2장이 단순 적층 되었을 때 σ_{11} 과 σ_{13} 은 경사와 위사가 굴곡하여 서로 교차되는 부분에서 높은 값을 보였고, 특히 σ_{11} 은 위사 부분에 집중하여 분포하였다. 반면에, 위상변화가 발생한 그림 10(b)에서는 굴곡 진경사다발의 정상부에서 σ_{33} 값이 증가했을 뿐 어떤 영역에서도 σ_{11} 과 σ_{13} 의 집중현상은 나타나지 않았다.

이와 같은 응력분포의 차이는 섬유다발의 상호작용으로부터 이해할 수 있다. 그림 7(a)에서 보인 바와

같이 위상변화 없이 단순 적층된 경우 굴곡부분에서의 인장-전단 커플링 변형의 증가로 인해 이 부분에서 높은 σ_{13} 이 발생하게 된다. 한편, 그림 7(b)와 같이 위상차를 갖고 적층된 경우에는 앞서 설명한 바와 같이 상대적으로 인장-전단 커플링 변형이 감소하므로 σ_{13} 역시 감소하는 것이다. 또한 이 경우 섬유다발의 상호작용은 커플링 변형이 반대 방향으로 발생하는 영역에서의 σ_{33} 을 증가시키는 원인이 된다.

그림 11은 첫 번째 층의 수지부분에서의 σ_{13} 의 분포를 보인 것이다. 그림 11(a)에서 위상변화가 없을 때는 섬유다발의 교차영역에서 σ_{13} 값이 높게 나타났는데 이는 인장-전단 커플링 변형의 증가와 섬유다발 영역 내의 응력분포의 연속성에 의한 것으로 보인다. 한편,

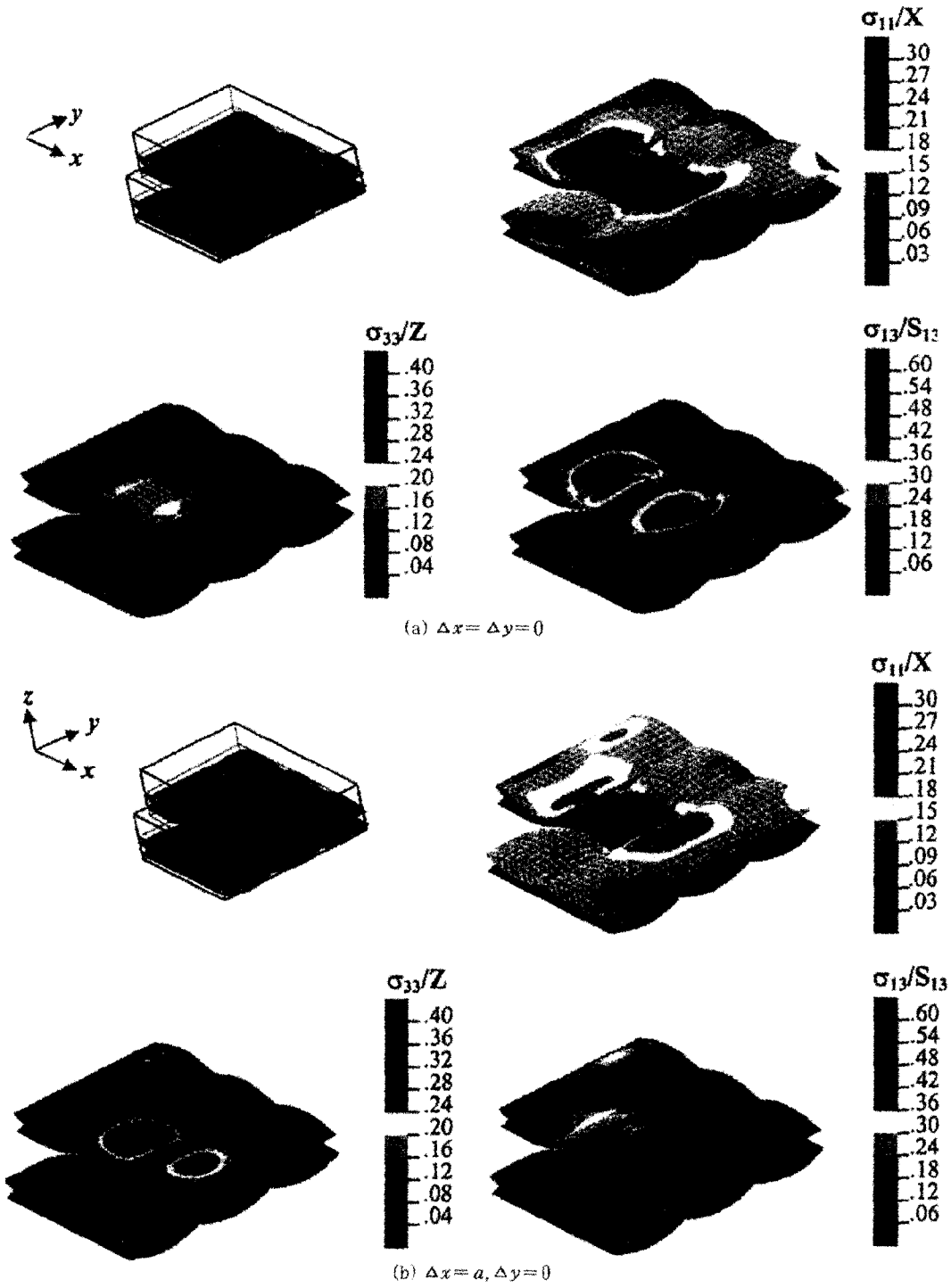


그림 10 Stress distribution for warp and fill tows region

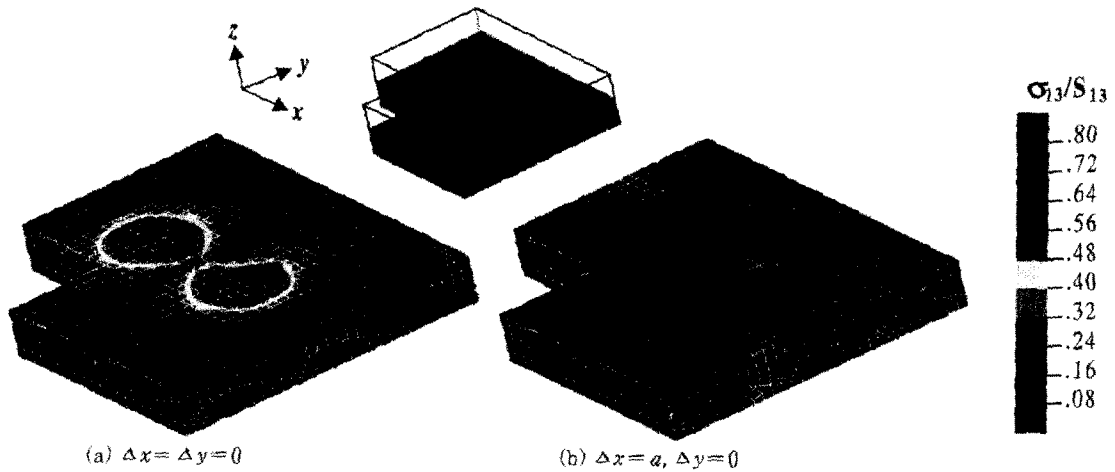


그림 11 Stress distribution for matrix pocket region

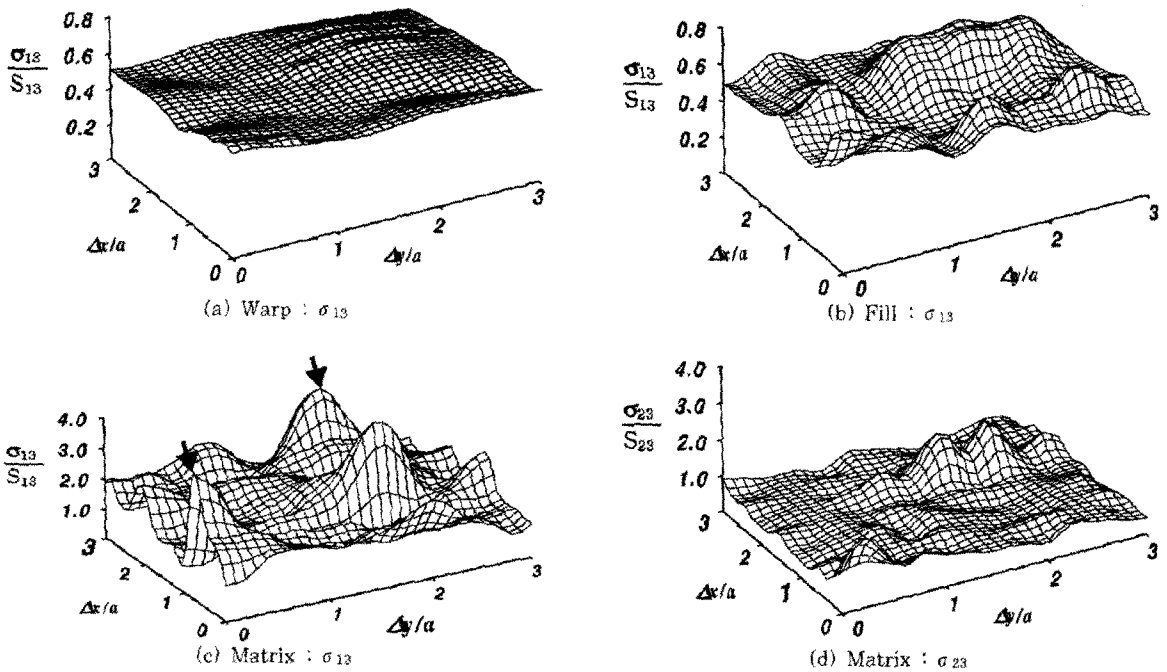


그림 12 Max stress distributions versus phase shift

그림 11(b)에 보인 바와 같이 σ_{13} 은 x-방향으로 a만큼 이동했을 때 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

그림 12는 위상변화에 따른 최대 응력의 변화를 보인 것이다. 최대 응력은 등가물성치와는 달리 위상변화의 영향을 크게 받아 매우 복잡한 분포를 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이, 일축 인장하중을 가했을 때 각

섬유다발에서의 주요 응력성분은 경사와 위사다발의 경우에는 σ_{13} , 그리고 수지의 경우에는 σ_{13} 과 σ_{23} 으로 나타났다. 특히 수지 부분에서의 응력은 경사와 위사에서의 응력에 비해 매우 높은 값을 보였다. 이 값은 부가된 명목 변형률이 0.1%인 것을 고려했을 때 매우 큰 값으로, 이는 초기 전단 파괴가 수지부분에서 부

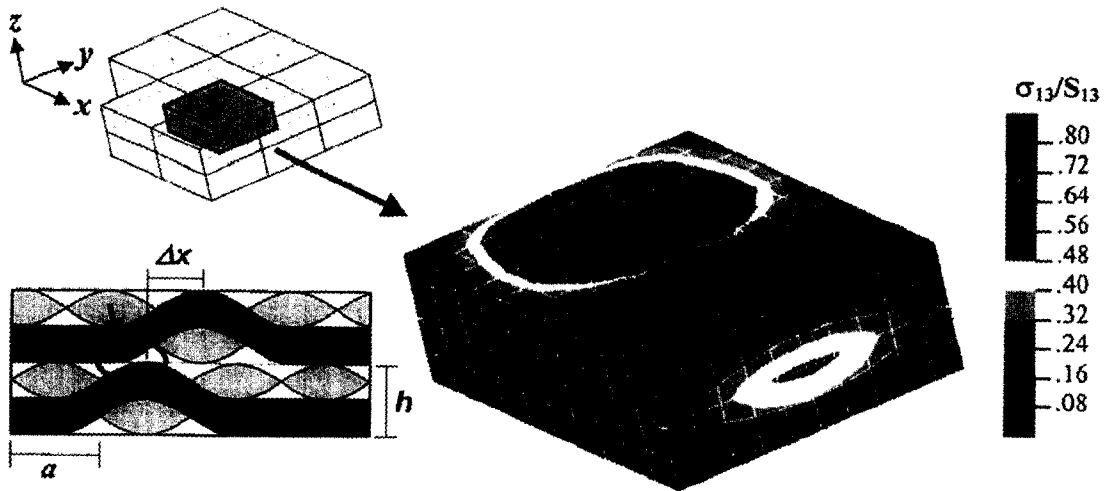


그림 13 σ_{13} distributions ($\Delta x = 0.6a$, $\Delta y = 0$)

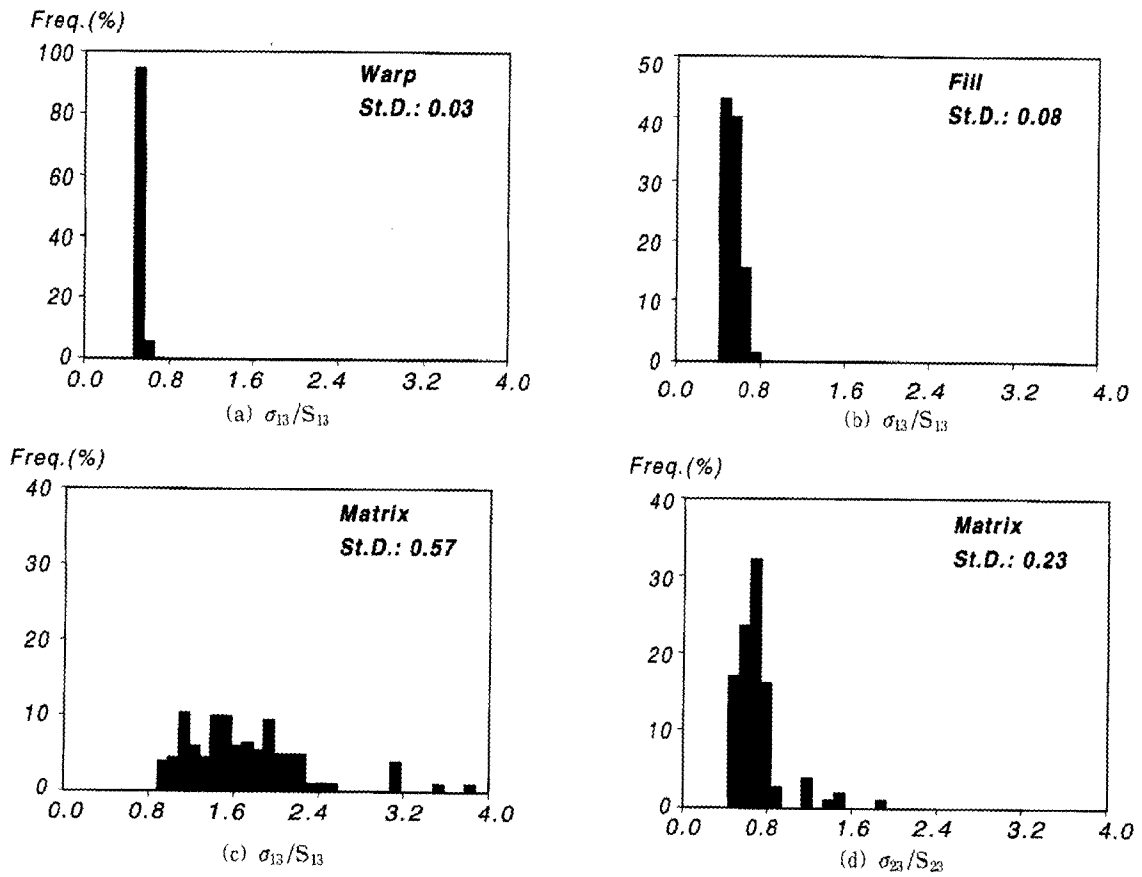


그림 14 Max stress histogram for two-layer 8-harness satin weave unit cell (▼ indicates mean values).

한다는 것을 의미한다.

그림 12에 보인 화살표는 σ_{13} 의 최대값을 나타낸 것이다. 이 때 최대응력은 그림 13에서 원으로 표시된 것과 같이 굴곡된 섬유다발이 인접하도록 배열되었을 때 발생한 값으로, 두 층의 섬유다발 사이에는 약간의 수지영역이 존재하게 된다. 이와 같이 배열된 구조물에 일축인장하중이 가해지면 원으로 표시된 영역에서는 복잡한 미세구조의 배열로 인해 심한 국부적 전단변형이 발생하게 되고, 그 결과 σ_{13} 이 증가하게 된다. 만약 이 그림이 y -방향으로의 이동을 나타낸 것이라고 하면 동일한 이유에서 σ_{23} 이 높은 값을 갖게 된다.

그림 14는 경사와 위사 및 수지의 최대 응력의 히스토그램을 보이고 있다. 이 그림에서 가로축의 응력 범위는 각 경우에 대한 응력의 분산 정도를 비교하기 위해 동일한 구간으로 나타내었고, 화살표는 평균값을 의미한다. 그림 14(a), (b)에 보인 바와 같이 경사와 위사에서의 응력은 낮은 값 부근에 밀집하여 분포하였다. 그러나 그림 14(c), (d)에 보인 수지의 경우에는 높은 응력이 존재하여 넓은 범위에 걸쳐 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 그림 14(c)에 보인 최대 응력 σ_{13} 은 매우 큰 분산성을 보여 초기 파괴응력의 정확한 예상을 어렵게 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 8-매 주자직 복합재료의 층간 섬유다발의 위상차가 등가물성치 및 응력분포에 미치는 영향을 조사하였다. 등가물성치 및 상세응력을 계산하기 위해 모의 일축인장시험을 수행하였고, 특히 상세응력 계산에는 매크로요소를 이용한 후처리기법을 사용하였다. 섬유다발의 위상차는 매크로요소의 부메쉬를 변화시켜 고려하였다.

계산 결과, 8-매 주자직의 등가물성치는 섬유다발의 위상변화에 크게 영향 받지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그러나 섬유다발의 위상 변화는 상세응력에 많은 영향을 미쳐, 섬유다발의 이동이 있는 경우와 없는 경우 서로 다른 응력분포를 나타냈다. 특히, 대부분의 응력값은 수지영역에서 가장 높은 응력을 보여 이 부분에서의 전단파괴를 암시하였다. 그러나 최대 응력분포는 매우 넓은 범위에 걸쳐 분포함으로써 초기 파괴응력의 정확한 예상을 어렵게 하였다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원사업 (과제번호 : KRF-99-041-E00104)에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. I. S. Raju, R. L. Foye, & V. S. Avva, "A Review of Analytical Methods for Fabric and Textile Composites", *To appear in Proceedings of Indo-US Workshop on Composite Materials for Aerospace Applications Indian Institute of Science Bangalore, India, July 23-July 27, 1990*
2. Ganesh, V. K. and N. K. Naik, "Failure Behavior of Plain Weave Fabric Laminates under On-Axis Uniaxial Tensile Loading: I-Laminate Geometry", *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 16, 1996, pp.1748~1778
3. Ishikawa, T. and T. W. Chou, "In-Plane Thermal Expansion and Thermal Bending Coefficients of Fabric Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, 1983, pp.92~104
4. Ishikawa, T. and T. W. Chou, "One-dimensional Micromechanical Analysis of Woven Fabric Composites", *AIAA Journal*, Vol. 21, 1983, pp.1714~1721
5. Avey, W. and C. Herakovich, "A Study on the Mechanical Behavior of a 2-D Carbon-Carbon Composite", *VPI&SU Interim Report 66*, 1987
6. Foye, R. L., "Finite Element Analysis of the Stiffness of Fabric Reinforced Composites", *NASA Contractor Report 189572*, 1992
7. Whitcomb, J. and Woo, K., "Enhanced Direct Stiffness Method for Finite Element Analysis of Textile Composites", *Composite Structures*, Vol. 28, 1994, pp.385~390
8. Woo, K. & Whitcomb, John D., "Effects of Fiber Tow Misalignment on the Mechanical Properties of Plain Weave Textile Composites", *Composite*

- Structures*, Vol. 37, No. 3/4, 1997, pp.34
3~355
9. Woo, K. and Young W. Suh, "Low Degree of Homogeneity Due to Phase Shifts for Woven Composites", *Accepted in Journal of Composite Technology & Research*, June 2001
10. Chapman, C., "Prediction of Moduli and Strength Woven Carbon-Carbon Composites Using Object-Oriented Finite Element Analysis", *Ph.D. Dissertation, Texas A&M University*, 1997
11. Woo, K. and J. D. Whitcomb, "A Post-processor Approach for Stress Analysis of Woven Textile Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 5, 2000, pp.693~704