

## 論文

## 두께방향으로 꿰매어 보강한 원통직교 적층판의 열응력 해석

이 호 형\*

## Thermal Stress Analysis on the Through-Thickness Reinforced Cylindrical Cross-Ply Laminate

Ho-Hyung Lee\*

## ABSTRACT

The stresses in the vicinity of a single stitch through the thickness of an infinite cylindrical cross-ply laminate subjected to a unit temperature decrease are computed. Interest centers on the potential for microcracking in the vicinity of the through-thickness reinforcement. The infinite cylindrical cross-ply model is a simplification which leads to a tractable axisymmetric formulation, but which retains many of the three dimensional features of the problem. In the model the stitch is a through-thickness cylinder consisting of fibers and resin and the laminate consists of plies with fibers oriented radially and plies with fibers oriented circumferentially. Here only a  $[0/90]_{2S}$  laminate is examined. Both glass and kevlar stitches are considered, as is the possibility of resin pockets forming near the stitch. The results indicate that the presence of a resin pocket can alter the stress state in the vicinity of the stitch. In particular, the sign of a peak in the radial stress that occurs at the outside of the laminate changes from compression to tension when resin pockets are considered. The normal stresses in the resin pocket are all positive and their values are larger in the case of kevlar stitch than in the case of glass stitch. This implies that the kevlar stitched laminate is more likely to produce microcracking due to high residual stress after curing than the glass stitched laminate.

## 초 록

무한한 원통직교 적층판을 두께 방향으로 꿰매어 보강한 섬유 주변에서의 단위온도 강하에 의한 응력분포를 구하였다. 여기에서의 관심사항은 보강용 섬유 주변에서의 미세균열의 가능성을 검토해 보는 것이다. 무한한 원통 직교적층판 모델은 쉽게 해석이 가능한 축대칭문제로 3차원 문제인 실제 문제를 단순화시키면서도 3차원적인 모든 점들은 그대로 유지하도록 하여 해석한 것이다. 이 모델에서 두께 방향으로의 보강용 섬유는 섬유와 수지로 구성된 두께방향의 원주이고, 적층판은 반경방향으로 섬유가 배열된 층과 원주방향으로 배열된 층으로 구성되어 있다. 여기서는  $[0/90]_{2S}$  적층판만을 고려하였다. 두께 방향으로 꿰매는 유리섬유와 케블라 섬유가 사용되어졌고, 보강용 섬유 주변에서 발생할 수도 있는 수지 밀집 부위도 고려의 대상으로 하였다. 연구결과 수지밀집 부위의 존재가 보강용 섬유 주변에서의 응력의 변화를 가져올 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 적층판의 표면에 발생하는 반경방향 수직응력이 수지밀집 부위가 존재하므로써 압축응력에서

\* 국방과학연구소

인장응력으로 변화함을 알 수 있었다. 수지밀집 부위에서의 수직응력들은 양의 값을 갖고, 그 크기는 케블라 섬유로 보강했을 때가 유리섬유로 보강했을 때보다 더 크다. 이것은 케블라 섬유로 보강된 적층판이 유리섬유로 보강된 적층판 보다 경화(curing) 후의 잔류응력이 크기 때문에 미세균열을 일으킬 가능성이 더 크다는 것을 의미한다.

## 1. 서 론

재래의 복합재 적층판은 두께방향으로의 보강이 없기 때문에 면외특성들(out-of-plane properties)이 취약하다. 이러한 두께방향으로의 취약성을 보강하기 위하여 3차원 짜기(3-D weaving), 3차원 땀기(3-D braiding), 두께방향으로 꿰매기(stitching) 등의 여러가지 방법들이 개발되어져 왔다. 복합재를 두께방향으로 꿰매어 보강하는 것은 손상허용치를 증가시키고, 조인트나 포피와 보강재가 접합된 부위, 또는 다른 불연속점의 근처에서 발생할 수 있는 면외응력(out-of-plane stresses)에 대한 저항력을 향상시킨다[1~3]. 하지만, 불행하게도 응고과정이나, 뜨겁고 습기찬 환경에서 순환되어 사용될 때, 미세균열이 보강용 섬유 주변에 발생할 수 있다. 그러한 균열은 재료의 수명에 아주 치명적일 수 있다. 이러한 미세균열에 대해서 모델을 세워 해석적으로 한 연구는 거의 없다. 문제의 복잡성을 고려할 때, 모델이 없었다는 것은 그리 놀라운 일이 아니다. 이 문제는 본래 3차원 문제이고, 적층판의 면내 및 면외 탄성계수와 열팽창계수, 그리고 보강용 섬유의 축방향 및 반경방향 탄성계수 및 열팽창계수에 의존한다. 게다가, 보강용 섬유의 직경, 초기장력, 보강용 섬유 주위에 발생할 수 있는 수지밀집 부위, 그리고 많은 다른 변수들이 미세균열에 영향을 미칠 수 있다.

3차원 해석이 이 문제에 대한 올바른 해석방법이지만, 문제의 복잡성과 어쩔 수 없이 사용해야 하는 유한요소법과 같은 수치해석을 사용하는데 대한 비용문제가 초기 연구단계에서 좀 더 단순화된 모델을 사용할 수 밖에 없게한다. 본 논문은 비교적 단순한 적층판에서 적층판과 보강용 섬유 사이의 상호작용에 초점을 맞춘 단순한 모델을 사용하여 발견한 점들을 기술하였다. 첫번째 중요한 관심사항은 보강용 섬유와 적층판 사이 경계면에서의 응

력들이다. 유리섬유와 케블라 섬유가 보강용 섬유의 재료로서 고려되어졌고, 두께방향으로 케메어 보강할 때 생길 수도 있는 수지밀집 부위도 고려되어졌다. 본 모델은 아주 단순한 모델이지만, 실제 문제의 중요 요소들을 포함하고 있다.

## 2. 모델에 대한 설명

본 모델은 3차원적인 실제 문제를 축대칭 문제로 변환시킨 것이다. 이러한 변환은 수치해를 얻을 수 있도록 문제를 단순화 시키기 위한 것이다. 본 모델은 그림 1에서 볼 수 있듯이 평판은 무한하고, 적층판은 직교 적층판으로서, 어느 층에서는 섬유가 반경방향으로 배치되어 있고, 어느층에서는 섬유가 원주 방향으로 배치되어 있다. 적층판의 단면은 그림 1의 아래 부분에 나타내어져 있으며, 반경방향과 두께방향은 각각  $r$ 과  $z$ 로 표시되어 있다. 본 연구에서는 적층판은  $[0/90]_{2S}$  한 가지만 고려하였다. 8층의 적층을 통과하는 보강용 섬유는 그림 1에서와 같이 원주로 이상화시켰다. 본 연구에서 보강용 섬유는 유리섬유나 케블라 섬유의 다발이며, 수지를 함유하고 있다.

적층판을 꿰매어 보강할 때, 인접한 보강용 섬유 사이의 거리가 충분히 떨어져 있어 서로 상호 작용이 없는 경우를 대상으로 하여, 평판을 무한 평판으로 가정하였다. 보강용 섬유 사이의 대칭성을 고려하여 그림 1의 보강용 섬유 중심에서 반경  $r_a$ 만큼 떨어진 두께방향의 직선 'aa'가 직선으로 남도록 구속하였다. 더 나아가, 직선 'aa'의 길이는 변화할 수 있다고 가정하였다. 따라서, 무한 적층판에서 반경  $r_a$  범위만 해석하였고,  $r=r_a$  위치에서 직선 'aa'가 직선으로 남는다는 경계조건이 적용되었다. 또한,  $r=r_a$ 에서 외력이 없다고 가정하였다. 그리고 적층판의 상하면에서도 외력이 없는 것으로 간주하였다.

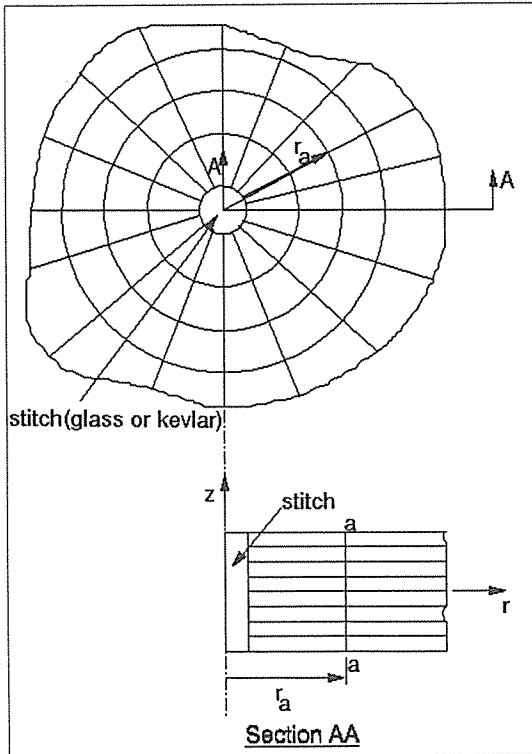


Fig. 1. Cylindrical Cross-Ply Laminate with Through-Thickness Stitch

재질들이 선형 탄성적으로 거동한다고 가정하여 단위온도가 하락하는데 따른 거동을 계산하였다. 이 단위온도 하락은, 선형 탄성 성질과 연계되어, 꽤맨 적층판이 응력이 없는 온도로 부터 냉각되는 것을 모방한 것이다. 보강용 섬유에는 초기 장력이 없다고 가정하였다. 이러한 가정들로 부터, 다른 온도 변화에 대한 거동은 단순히 온도 변화 만큼 곱하여 구해질 수가 있다.

여기서, 해석된 범위의 직경  $r_a$ 는 1.524mm이다. 실제 사용되고 있는 두께 방향으로 꽤맨은 섬유의 직경을 고려하여, 보강용 유리섬유의 직경은 0.508 mm, 케블라 섬유의 직경은 0.254mm로 가정하였다. 적층 하나의 두께는 0.15mm로 잡았다. 직경  $r_a = 1.524\text{mm}$ 의 영역을 해석한 것이 보강용 섬유 사이의 상호작용이 없는 무한 평판을 해석한 것과 같은 것은 제 4 절의 응력 분포를 계산한 결과를 보면 알 수 있다. 수지밀집 부위는 순수한 수지의 성

질을 갖는 영역을 보강용 섬유주위에 추가함으로써 모델링 하였다.

표 1은 본 연구에 사용된 재료의 물성치이다. 그래파이트-에폭시 물성치가 각각의 적층판을 모델링하는데 쓰여졌고, 여기서 아래첨자 1-2-3는 물질좌표계(principal material system)의 표준 표기법을 따른다. 유리섬유로 된 보강용 섬유를 나타내는 원주는 수지를 함유하게 되기 때문에 글래스-에폭시의 성질을 갖는 것으로 가정하였다. 보강용 섬유에 있어서, 1 방향은 두께방향을 나타낸다. 보강용 섬유는 두께 방향에 직각인 평면에서 횡등방성(transversely isotropic)이라고 가정하였다. 보강용 케블라 섬유의 성질은 케블라-에폭시로 가정하였고, 수지밀집 부위의 성질은 등방성으로 가정하였다.

Table 1. Material Properties Used

Property	Graphite-Epoxy	Glass-Epoxy	Kevlar-Epoxy	Resin
$E_1$ , GPa	137.81	38.59	75.59	0.50
$E_2$ , GPa	8.96	8.27	5.51	0.50
$E_3$ , GPa	8.61	8.96	5.51	0.50
$G_{12}$ , GPa	7.10	4.13	2.27	—
$G_{13}$ , GPa	7.10	4.13	2.27	—
$G_{23}$ , GPa	6.20	3.45	2.07	—
$\nu_{12}$	0.3	0.26	0.34	0.38
$\nu_{13}$	0.3	0.26	0.34	0.38
$\nu_{23}$	0.49	0.34	0.34	0.38
$\alpha_1$ , $^{\circ}\text{C}$ ( $\times 10^{-6}$ )	-0.30	8.64	-3.96	64.80
$\alpha_2$ , $^{\circ}\text{C}$ ( $\times 10^{-6}$ )	28.08	22.14	79.20	64.80
$\alpha_3$ , $^{\circ}\text{C}$ ( $\times 10^{-6}$ )	28.08	22.14	79.20	64.80

### 3. 유한 요소 해석

수치해석 기법으로는 유한요소법을 사용하였는데, 일반 상용 프로그램인 ABAQUS가 사용되었다. 그림 2는 사용된 유한요소의 한 예를 보여준다. 적층판은 대칭이기 때문에 8개의 적층을 모두 해석하는 대신 위쪽 4개 층만 해석하였고, 대칭 면에

대칭 경계조건을 적용하였다. 이 대칭 경계조건은 수직방향으로는 움직일 수 없고, 반경방향으로만 움직일 수 있음을 의미한다. ABAQUS에서 사용된 유한요소는 8절점의 직사각형 축대칭 요소인 CAX8 요소이다. 사용된 유한요소의 수는 3000개이다. 보강용 섬유 부위에 대한 유한요소와 적층판 부위에 대한 요소가 그림 2에 나타나 있다.

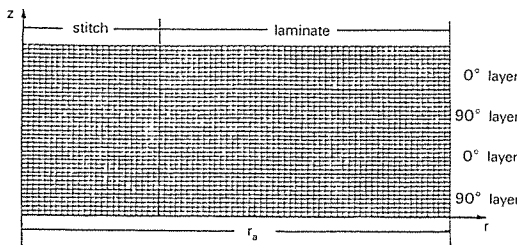


Fig.2. Finite-Element Mesh of Stitch and Cross-Ply Laminate

#### 4. 결 과

##### 4-1. 보강용 유리섬유 주위에서의 응력

두께 방향으로 꿰매어 보강한 섬유를 유리섬유를 사용하고, 이 유리섬유와 적층판간의 접합이 완전하다고 가정할 때, 단위온도 강하에 따른 변형이 그림 3에 나타내졌다. 온도 강하에 따른 보강용 섬유의 축방향 수축, 즉 보강용 섬유의 적층판 두께 방향의 수축은 적층판의 두께방향의 수축보다 적다. 이 두께 방향의 수축의 차이가 보강용 섬유의 적층판의 경계면에서의 응력상태를 복잡하게 만든다. 경계면에서의 응력상태는 그림 4와 같다. 이 그림에서 보강용 섬유 쪽의 응력은 실선으로, 적층판 쪽의 응력은 점선으로 나타내어져 있다. 여기서,  $\sigma_r$ 은 반경방향 수직응력,  $\sigma_\theta$ 는 원주 방향 수직응력,  $\sigma_z$ 는 두께 방향 수직응력,  $\tau_{rz}$ 는 두께방향 전단응력을 나타낸다. 반경방향 수직응력( $\sigma_r$ )을 관찰하면, 전 두께에 걸쳐서 반경방향 응력이 양임을 알 수 있는데, 이는 온도가 강하함으로써 보강용 섬유의 반경방향 수축이 적층판의 반경방향 수축보다 커서 보강용 섬유와 적층판이 서로 떨어지려 한다는 것을 알 수 있다. 적층판의 층간 경계면에서

서의 반경 방향 수직 응력이 급격히 증가하는 것은 그 곳에서의 재료의 변화에 따른 singlar 거동(singular behavior)에 의한 것이다. 여기서 눈여겨 볼 점은 적층판의 표면에서 반경방향의 응력이 음이라는 것이다. 그 크기가 급격히 증가하는 것도 또한 두 물질의 경계면(보강용 섬유와 0° 층)에서의 singlar 거동(singular behavior)에 의한 것이다. 이것은 단순히 다른 형태의 자유끝단 효과(free-edge effect)이다.

두께방향 수직응력( $\sigma_z$ )는 적층판에서는 양의 값을 갖고, 보강용 섬유에서는 음의 값을 갖는데, 이는 그림 3의 변형된 모양을 보면 알 수 있는 바, 그림 3에서 보강용 섬유는 두께방향으로의 변형량이 적고, 적층판은 두께방향으로의 변형량이 크기 때문이다.

원주방향 수직응력( $\sigma_\theta$ )는 보강용 섬유에서는 양이고 두께방향으로 재료의 변화가 없으므로 연속적이며, 적층판에서도 0° 층에서는 양이고, 90° 층에서는 음의 값을 갖고, 층별로 재질이 변하는데 따라 점프가 일어난다. 이러한 응력 분포의 양상 또한 90° 층에서는 섬유가 원주 방향으로 배열되어 있어 원주방향으로의 변형량이 적고, 90° 층과 보강용 섬유에서는 원주방향의 변형량이 크기 때문이다.

두께방향 전단응력( $\tau_{rz}$ )은 반경방향 수직응력과 마찬가지로 보강용 섬유의 적층판에서 같은 값을 갖는다. 전 두께에 걸쳐 음의 값을 갖는 것은 경계면에서 적층판이 보강용 섬유보다 두께방향으로 더 많이 변형하여 보강용 섬유 표면에서 전단응력의 방향이 아래쪽(-z)을 향하기 때문이다.

그림 5는 모델 영역의 끝쪽 경계면에서의 응력을 나타낸다. 이 그림에서  $\sigma_z$ 와  $\tau_{rz}$ 가 매우 작음을 알

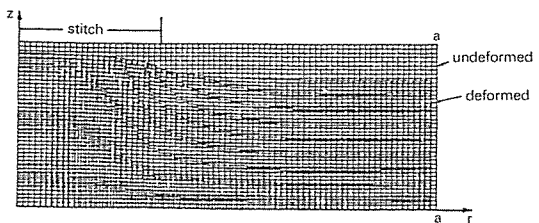


Fig.3. Deformation of Cross-Ply Laminate with Glass Stitch

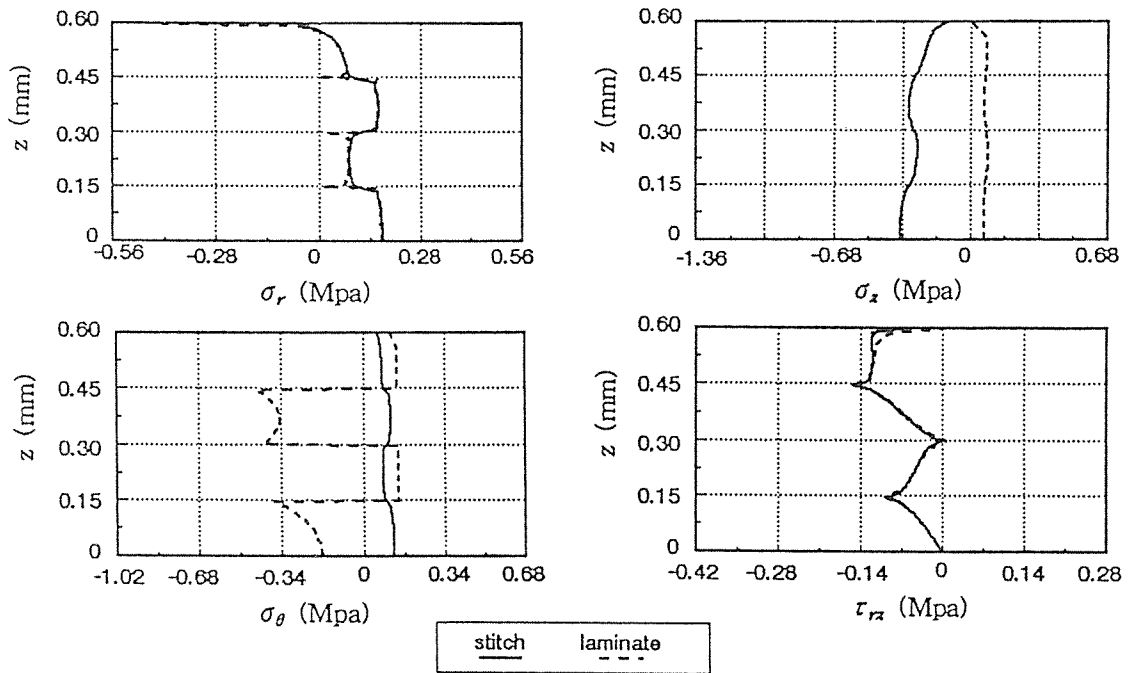


Fig. 4. Stresses at Interface Between Glass Stitch and Cross-Ply Laminate

수 있는데, 이는 고전적인 적층판 이론의 평면응력가정(plane stress assumption)과 일치하는 것으

로서, 모델의 바깥쪽 경계면의 보강용 섬유로부터 충분히 멀리 떨어져서 보강용 섬유의 존재에 의한

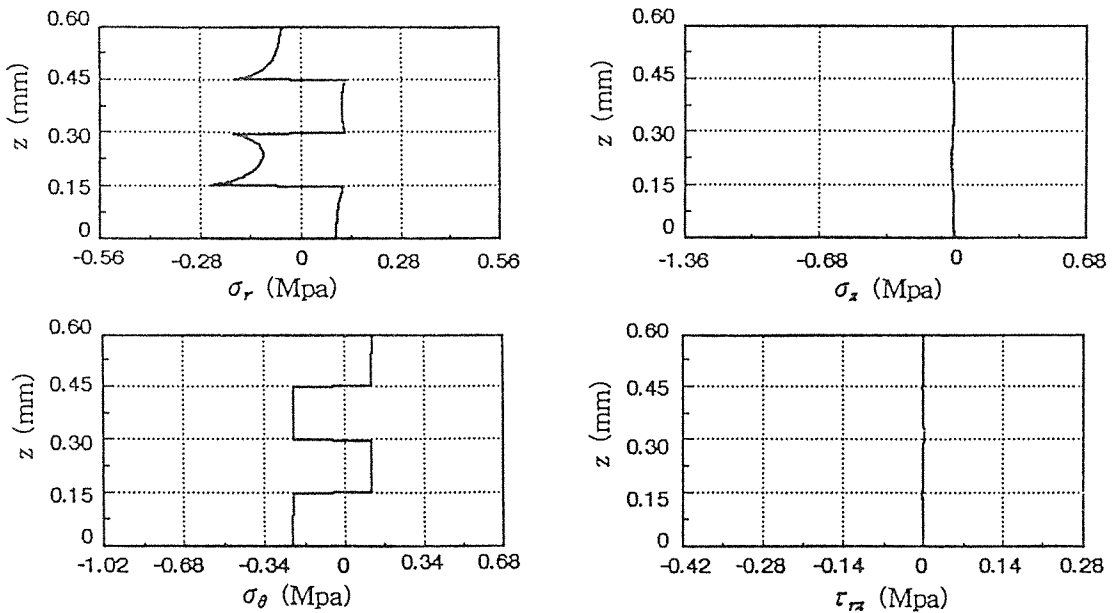


Fig. 5. Stresses at Outer Radius of Cylindrical Cross-Ply Laminate with Glass Stitch

영향을 받고 있지 않다는 것을 보여준다.

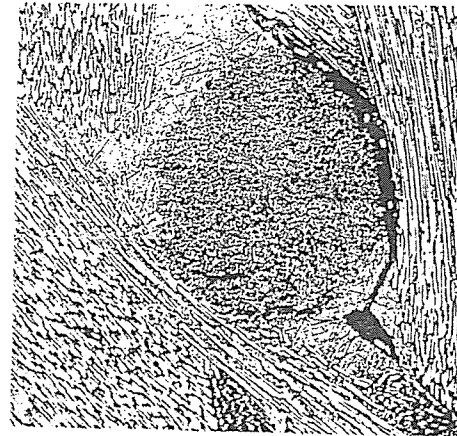
반경방향 수직응력은 모델영역의 끝쪽 경계면이 직선으로 남도록 구속하였기 때문에 반경방향으로의 수축이 작은  $0^\circ$  층에서는 압축응력을 받아 음의 값을 갖고, 반경방향으로의 수축이 큰  $90^\circ$  층에서는 양의 값을 갖는다.

원주방향 수직응력도 원주방향으로의 수축이 큰  $0^\circ$  층에서는 양의 값을 갖고, 원주 방향으로의 수축이 작은  $90^\circ$  층에서는 음의 값을 갖는다.

#### 4-2. 보강용 케블라 섬유 주위에서의 응력

케블라 섬유로 보강하는 것이 유리섬유로 보강하는 것 보다 용이하기 때문에 많은 경우 케블라 섬유가 사용된다. 그림 6은 흔히 사용되는 보강용 유리섬유와 케블라 섬유의 단면을 50배로 확대한 현미경 사진이다. 사진에서 가운데 둥근 부위가 보강용 섬유인데, 유리섬유 다발의 직경이 케블라 섬유다발의 직경보다 약 2배 가량 크다. 케블라 섬유의 물성치가 유리섬유의 물성치와 다르기 때문에 보강용 섬유를 유리섬유에서 케블라 섬유로 바꾸는 데는 두가지 변경사항이 발생한다. 하나는 직경이고, 다른 하나는 물성치이다.

보강용 케블라 섬유를 연구하기 전에 두 가지 변화의 효과를 별도로 고려하기 위하여 작은 직경의 보강용 유리섬유를 먼저 검토하여 보았는데, 그림 7과 그림 4를 비교해 보면 알 수 있듯이, 보강용 섬유와 적층판 사이의 경계면에서 굵은 직경의 보

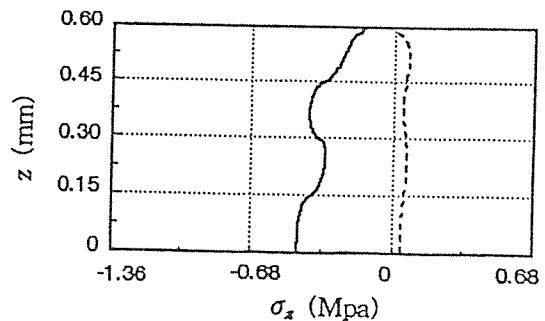
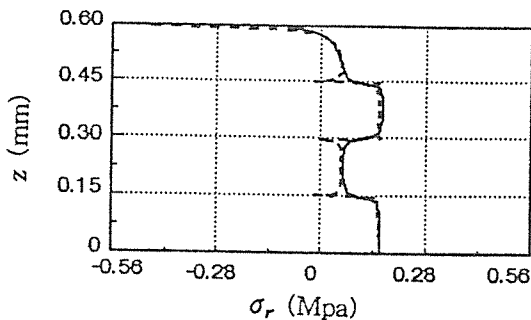


Glass Stitch



Kevlar Stitch

Fig. 6. Photograph of Cross Section of Glass Stitch and Kevlar Stitch(x50)



stitch      laminate

Fig. 7. Stresses at Interface Between Small Diameter Glass Stitch and Laminate

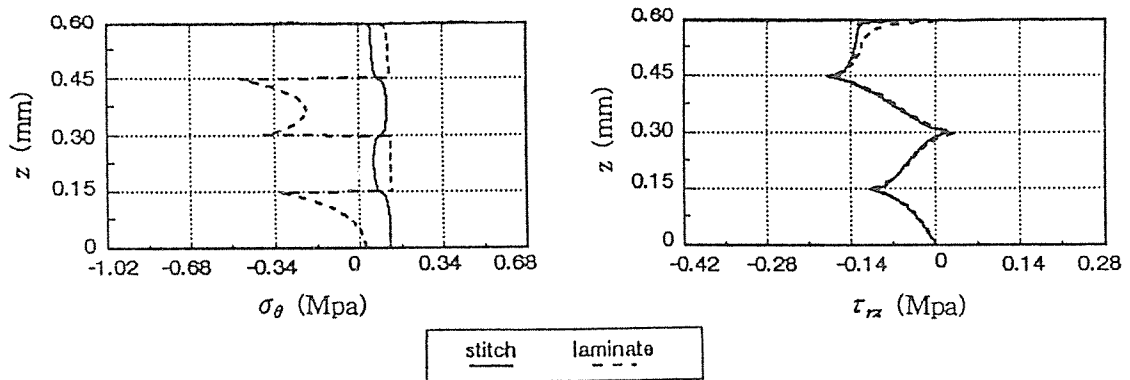


Fig. 7. Continued

강용 유리섬유에 비하여 별다른 응력의 변화를 발견할 수 없었다. 이 결과 또한 본 연구에서 택한 모델의 바깥쪽 경계가 보강용 섬유로부터 충분히 떨어져 있어, 무한 평판을 해석한 것과 동일하다는 것을 증명한다.

케블라 섬유로 보강한 적층판의 단위 온도 강하에 따른 변형의 모양이 그림 8에 나타나 있다. 유리 섬유와 비교해 볼 때, 케블라 섬유의 두께 방향의

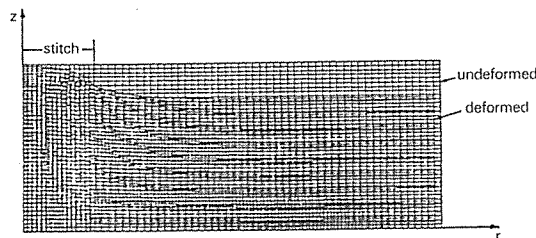


Fig. 8. Deformation of Cross-Ply Laminate with Kevlar Stitch

수축이 적다는 것을 알 수 있다. 이렇게 케블라 섬유의 두께방향 수축이 작은 이유는 표 1에서 케블라 섬유의 섬유방향 열팽창 계수( $\alpha_1$ )이 음인 것으로 부터 이해될 수 있다. 이러한 두께 방향의 수축의 차이는 케블라 섬유에서 전단응력이 커지는 요인이 된다.

보강용 케블라 섬유와 적층판의 경계면에서의 응력은 그림 9에 설명되어 있다. 그림 4의 유리섬유의 경우와 비교해 볼 때, 인장응력인 반경 방향의 응력이  $0^\circ$  층과  $90^\circ$  층에서 공히 더 크음을 알 수 있다. 반경방향 응력의 크기가 거의 두배로 되었으며,  $0^\circ$  층과  $90^\circ$  층에서 거의 같게 되었다. 이것은 케블라에서 섬유방향에 직각인 방향의 열팽창계수( $\alpha_2$ )가 비교적 크기 때문에 보강용 케블라 섬유의 다발이 반경방향으로 수축이 더 많이 일어나기 때문인 것으로 이해된다(표 1). 전단응력  $\tau_{rz}$ 는 앞에서 설명했듯이 두께방향의 수축의 차이로 인하여 케블라

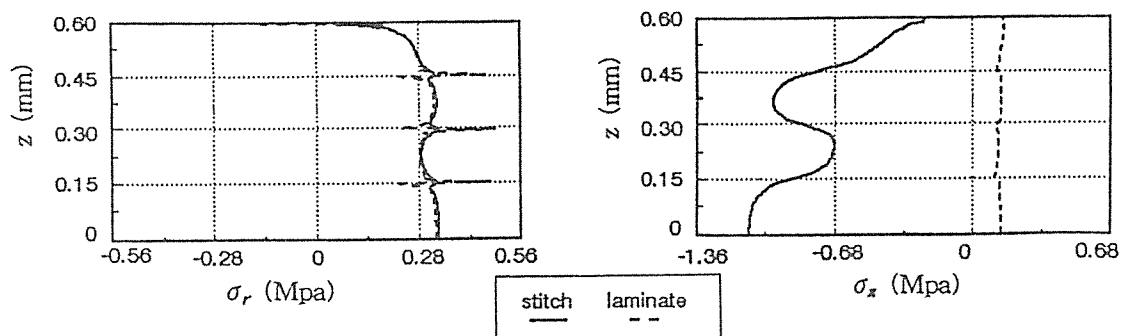


Fig. 9. Stresses at Interface Between Kevlar Stitch and Cross-Ply Laminate

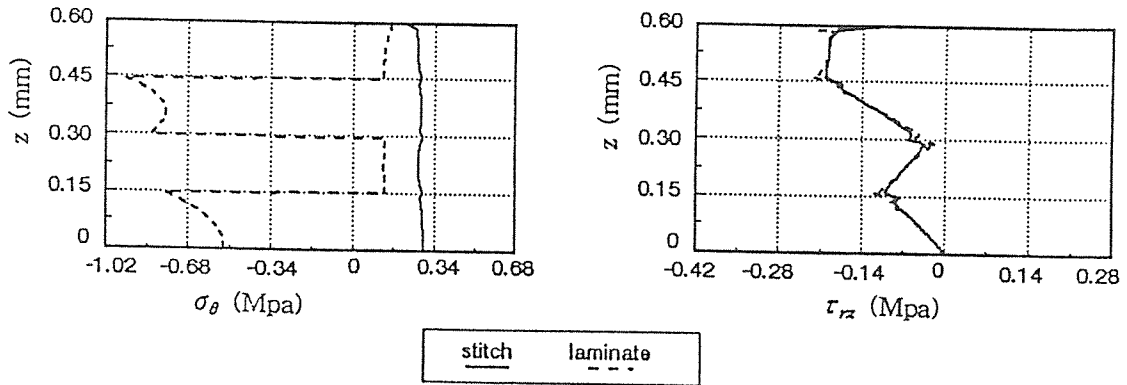


Fig.9. Continued

섬유에서 더 큰 값을 갖는다. 원주 방향 수직응력은 보강용 섬유 자체에서는 인장응력으로서 유리섬유보다 큰 값을 갖고, 적층판에서는 압축응력으로서 0° 층, 90° 층 모두 유리섬유의 경우보다 크다. 이들 응력상태로 볼 때 케블라 섬유가 미세균열을 일으킬 가능성이 더 많음을 알 수 있다.

#### 4-3. 수지 밀집 부위의 영향

보강용 섬유가 적층판을 통과할 때 보강용 섬유가 적층판의 섬유를 밀쳐내게 되는데, 이때 보강용 섬유와 적층판 섬유의 벌어진 부분에 빈 곳이 생긴다. 섬유 방향으로서는 좁 길게 벌어지고, 섬유 방향에 직각인 방향으로서는 보강용 섬유에 거의 닿게 된다. 이곳이 수지로 채워져 수지밀집 부위가 발생하게 된다. 현미경으로 관찰해 보면, 보강용 유리섬유 주위의 수지밀집 부위와 보강용 케블라 섬유 주위의 수지밀집 부위의 형상이 서로 다르다. 본 연구의 원통 직교 적층판에서는 유리섬유로 보강된 적층판에서의 수지밀집 부위를 고려하기 위하여 0° 층에서는 수지밀집 부위를 조금 크게 하였고, 90° 층에서는 수지밀집 부위를 조금 작게 하였다. 케블라 섬유 보강 적층판에서는 모든 층에 작은 수지밀집 부위를 두었다. 이들 두가지 경우의 수지밀집 부위의 모양이 그림 10과 그림 11에 나타나 있다.

수지밀집 부위가 있는, 유리섬유로 보강된 적층판의 변형된 모양은 그림 12와 같다. 수지밀집 부

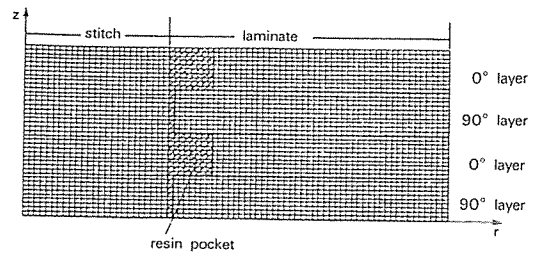


Fig.10. Finite-Element Mesh of Glass Stitch and Resin Pocket

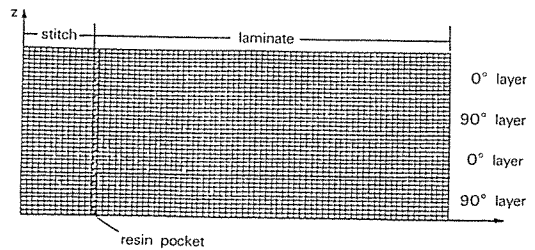


Fig.11. Finite-Element Mesh of Kevlar Stitch and Resin Pocket

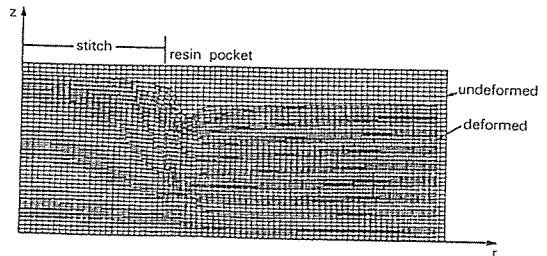


Fig.12. Deformation of Cross-Ply Laminate with Glass Stitch and Resin Pocket

위가 없는 경우인 그림 3과 비교해 볼 때, 변형된 모양이 매우 심함을 알 수 있다. 이는 수지의 열팽창



계수가 적층판이나 보강용 섬유에 비하여 매우 크기 때문이다.

보강용 섬유와 수지 사이의 경계면에서의 응력은 그림 13과 같다. 그림에서 보강용 섬유 쪽의 응력은 'stitch'로 수지쪽의 응력은 'resin'으로 나타나 있다. 이를 수지밀집 부위가 없는 경우인 그림 4와 비교해 보기로 한다. 반경방향 응력에 대해서는 가장 두드러진 차이는 적층판 표면에서의 응력의 방향이다. 수지밀집 부위가 없었을 경우에는 응력의 방향이 압축응력이었으나, 수지밀집 부위가 있으므로 인장응력으로 변화하였다. 이로부터, 수지밀집 부위가 존재함으로써 적층판의 표면의 보강용 섬유와 수지사이에서 미세균열이 발생할 가능성이 더 많다는 것을 알 수 있다. 적층판 내부에서는 반경방향 수직응력이 수지밀집 부위가 없는 경우와 별로 차이가 없음을 알 수 있다. 전단응력  $\tau_{rz}$ 도 별로 차이가 없다. 원주방향 응력은 수지에서는 전체 두께에 걸쳐 재료의 성질이 변하지 않으므로 적층판에서와 달리 점프가 발생하지 않는다. 그림 13에서 수직응력들을 관찰해 보면, 수지에서의 수직

응력들이 모두 인장응력임을 볼 수 있다. 이 또한 수지에서 균열이 발생할 수 있다는 것을 보여주는 것이다.

수지밀집 부위를 고려한 케블라 섬유 보강 적층판의 변형된 모양은 그림 14에 나타나 있다. 이 경우 또한 수지 밀집 부위가 심하게 변형되어 있음을 알 수 있다. 케블라 섬유와 수지 사이의 경계면에서의 응력상태는 그림 15와 같다. 수지밀집 부위가 없는 경우인 그림 9와 비교해 볼 때, 가장 두드러진 점은 유리섬유의 경우에서와 같이 적층판 표면에서의 반경방향 응력의 방향의 변화이다. 수지에서의 수

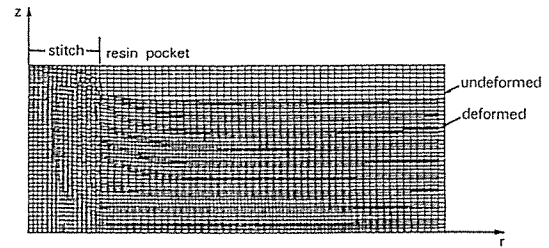


Fig. 14. Deformation of Cross-Ply Laminate with Kevlar Stitch and Resin Pocket

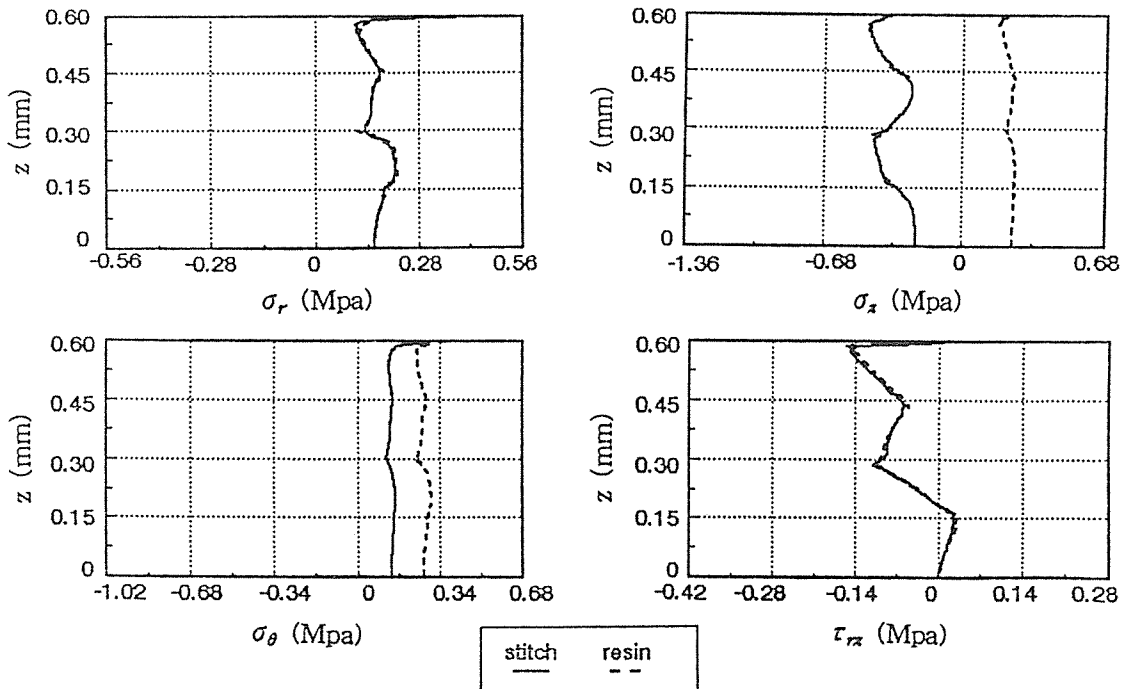


Fig. 13. Stresses at Interface Between Glass Stitch and Cross-Ply Laminate with Resin Pocket

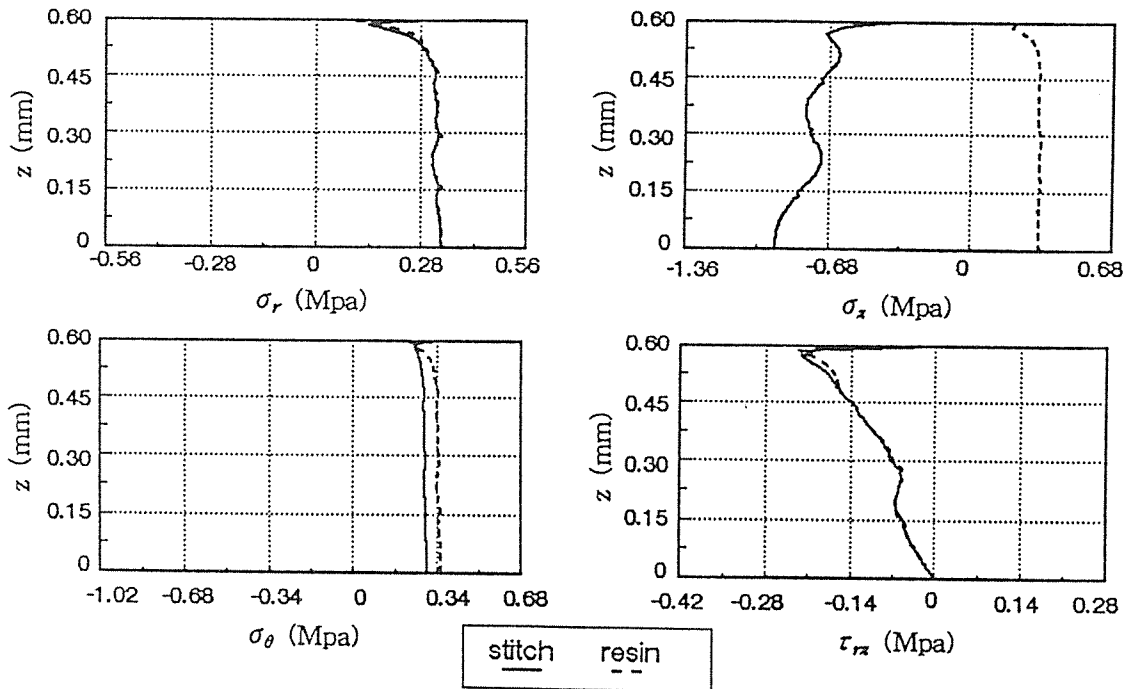


Fig. 15. Stresses at Interface Between Kevlar Stitch and Cross-Ply Laminate with Resin Pocket

직응력들을 관찰해 보면 유리섬유의 경우에서와 같이 모든 수직응력들이 인장응력이며, 유리섬유의 경우 보다 그 값들이 크을 알 수 있다.

## 5. 결 론

지금까지 두께방향으로 케메어 보강한 적층판의 열로 인하여 야기된 응력에 대하여 단순화된 모델을 이용한 연구결과에 대하여 설명하였다. 축대칭인 원통 직교 적층판이 사용되었고, 적층판은 [0/90]<sub>2s</sub>이 사용되었다. 본 모델은 비록 단순화된 모델 이기는 하지만 실제 문제에서의 3차원적인 요소들을 포함하고 있다. 재료들이 선형 탄성적으로 거동한다고 가정하고 단위 온도 강하에 따른 보강용 섬유 주위에서의 응력을 관찰하는데 중점을 두었다. 두 가지 종류의 보강용 섬유를 사용하였으며, 보강용 섬유 주위에 수지 밀집 부위가 발생하는 것도 고려하였다.

유리섬유로 보강된 적층판에서 보강용 섬유와 90° 층 사이의 반경방향의 인장응력이 보강용 섬유와

0° 층 사이의 반경방향 인장응력 보다 크다. 따라서, 미세균열은 90° 층에서 발생할 가능성이 0° 층에서 발생할 가능성 보다 더 크다. 적층판의 표면에서 보강용 섬유와 0° 층 사이에 반경방향의 압축응력이 발생하며, 자유끝단효과(free-edge effect)에 의하여 그 크기가 급격히 증가한다. 보강용 섬유를 케블라 섬유로 사용하였을 경우에도 적층판의 표면에서 보강용 섬유와 0° 층 사이에 큰 압축응력이 발생하고, 적층판 내부에서의 반경방향의 인장응력이 유리섬유를 사용했을 경우에 비해서 크다. 이렇게 반경방향의 인장응력이 더 크다는 것은 케블라 섬유를 사용하여 보강하였을 때 미세균열이 더 잘 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

보강용 섬유 주위에 수지밀집 부위가 있을 경우에는 수지밀집 부위가 없는 경우에 비해서 변형이 극심하며, 응력상태도 많이 달라진다. 이것은 수지의 열팽창계수가 매우 크기 때문이다. 두드러진 응력 변화의 하나는 적층판의 표면 보강용 섬유 경계면에서 반경방향의 응력이 수지밀집 부위가 없을 때는 압축응력이 인장응력으로 바뀌는 것이다.

자유끝단효과와 결부되어, 이것은 바로 미세 균열의 원인이 될 수 있는 것이다. 수지에서는 모든 수직 응력들이 양의 값을 갖게 되고, 전단응력도 가세하여, 이 응력 상태는 수지의 파단을 유발할 수 있는 요인이 된다. 케블라 섬유로 보강했을 때 수지에서의 응력이 더 큰 값을 갖는 것으로 부터, 보강용 섬유 주위에 수지밀집 부위를 고려한 경우도 케블라 섬유의 경우가 경화(curing)후 잔류응력이 더 크기 때문에 미세균열이 일어날 가능성이 더 많음을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Kang, T.J., Lee, S.H., "Effect of Stitching on the Mechanical and Impact Properties of Woven Laminate Composite," *Journal of Composite Materials*, Vol.28, No.16, 1994, pp.1574-1587.
2. Pelstring, R.M. and Madan, R.C., "Stitching to Improve Damage Tolerance of Composites," 34th International SAMPE Symposium, 1989.
3. Dexter, H.B., Funk, J.G., and Lubowinski, S.J., "Experimental Evaluation of Stitched Graphite/Epoxy Composites in 3-D Composite Materials, NASA CP-2420, 1986.