

〈논 문〉

연속섬유가 보강된 2상 복합재료의 종방향 전단계수 해석

이동주* · 정태현*

(1995년 12월 29일 접수)

Effective Longitudinal Shear Modulus of Continuous Fiber-Reinforced 2-Phase Composites

Dong Joo Lee and Tae Heon Jeong

Key Words : Longitudinal Shear Modulus(종방향 전단계수), 2-Phase Composites(2상 복합재료), Unit Cell(단위격자), Fiber Array(섬유배열), Fiber Shape(섬유모양)

Abstract

Longitudinal shear modulus of continuous fiber reinforced 2-phase composites is predicted by theoretical and numerical analysis methods. In this paper, circular, hexagonal and rectangular shapes of reinforced fiber are considered using unit cell concept. And fiber array is regular rectangular and hexagonal fiber arrangement. Longitudinal shear modulus is a function of fiber distribution pattern and fiber volume change. It is found that the rectangular array has a higher longitudinal shear modulus than the hexagonal one. Also, the rectangular fiber shape in lower fiber volume fraction and the circular fiber shape in higher fiber volume fraction show the higher longitudinal shear modulus. And it has been found that the theoretical and numerical predictions of the longitudinal shear modulus give a good agreement with the experimental data at lower fiber volume fraction. Both the distance and stress transfer between the fibers are discussed as the major determining factors.

1. 서 론

최근 공학적 재료로 많이 사용되는 섬유강화 복합재료는 중량에 비해 고강도 고경도를 가지므로 고도의 기능과 성능이 요구되는 분야에 사용되며, 재료들의 특성은 사용되는 소재(기지, 섬유)들의 성질, 형태, 배열상태 그리고 제조과정에 의해 결정된다. 이러한 섬유강화 복합재료의 물성치에 대한 연구나 다양한 방법을 통하여 진행되어 왔다.

일반적인 복합재료의 물성해석은 복합재료를 구성하는 섬유와 기지를 구분하여 각각의 기계적 성

질을 알고 있다는 가정을 기초로 하며, 비균질한 재료로 모델링하여 해석하는 미시적 관점의 유한요소 해석법은 기지재료에 보강재가 규칙적인 배열과 분포를 나타내는 단위격자(unit cell) 개념으로 발전해 왔다. 지금까지 금속기지 복합재료(metal matrix composites)와 고분자기지 복합재료(polymer matrix composites)에서 불연속섬유로 보강된 복합재료의 물성치에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 연속섬유가 보강된 2상 복합재료의 모델링을 통한 물성치 및 미시적 관점에서 기지 재료와 섬유의 역학적 관계에 대한 연구가 많지는 않은 상태이다.

연속섬유가 보강된 복합재료의 일반적 모델을 Fig. 1에 나타냈다. 여기서, 탄성계수(elastic

*회원, 영남대학교 기계공학과

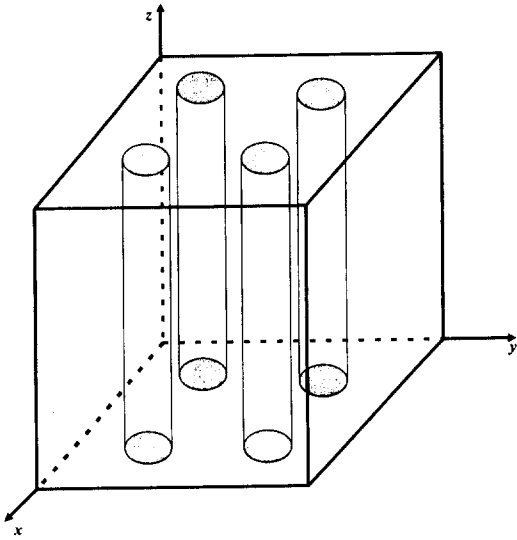


Fig. 1 Schematic of continuous fiber reinforced composites containing an array of fiber in elastic matrix

modulus)는 종방향 탄성계수(longitudinal modulus : E_{zz})와 횡방향 탄성계수(transverse modulus : E_{xx} , E_{yy})로 구분되며, 전단계수(shear modulus)는 종방향 전단계수(G_{xz} , G_{yz})와 횡방향 전단계수($G_{zx}=G_{zy}$, $G_{xy}=G_{yx}$)로 구분된다. 여기서 종방향이란 보강되는 섬유방향이며, 횡방향이란 섬유의 수직인 방향이다.

지금까지 보강되는 섬유형태 및 배열에 따른 탄성계수 해석은 이론 및 수치해석방법을 이용한 많은 연구가 수행되어 왔다. 최근, 섬유배열의 관점에서 Ravichandran⁽¹⁾는 단위격자에서 섬유의 형태가 사각형일 때 횡방향 탄성계수를 계산하였고, Chen⁽²⁾과 Prew⁽³⁾ 등은 보론(boron) 섬유가 보강된 알루미늄 복합재료의 실험결과 및 유한요소해석 결과를 비교했다. 그의 문헌에서 사각배열이 육각배열보다 횡방향 탄성계수가 크게 나타남을 보였다. 또한, Shen 등⁽⁴⁾은 유한요소해석을 이용하여 단위격자 내에 섬유의 형상이 원형, 육각형, 사각형일 때, 섬유체적비를 변화시키면서 종방향 탄성계수를 예상했다. Ward와 Wilczynski⁽⁷⁾는 섬유형상이 사각형 및 배열이 사각배열일 때, 경계 영역에 초점을 맞추어 종방향 및 횡방향 탄성계수를 해석했다. 그러나, 이와 같은 탄성계수의 해석에 비해 복합재료의 전단계수의 해석은 드문 실정이다.

섬유강화 복합재료의 기본 물성치 중의 하나인

전단계수 해석방법에서 섬유의 배열 및 형태에 따른 해석은 실제 복합재료 제조 및 역학적 해석의 중요성 때문에 주로 이론적 해석 및 단위격자의 모델링을 통한 수치해석적 방법으로 행하여지고 있다. 이의 예로서 미시적 관점에서 Chou 등⁽⁵⁾은 상(phase)을 기하학적으로 간단하게 표현하여 단섬유 복합재료(short fiber reinforced composites)의 전단계수를 구했으며, Nomura와 Chou⁽⁶⁾는 상하경계영역(upper-lower bound)에 초점을 맞추어 종방향 전단계수를 해석했다.

연속섬유가 보강된 2상 복합재료의 연구에서, Hashin-Rosen⁽⁸⁾은 원형 단면섬유의 육각배열에서 종방향 전단계수를 이론적으로 해석했으며, 복합재료의 종방향 전단계수는 섬유와 기지의 전단계수와 섬유 체적비의 함수로 표현하였다. Adams⁽⁹⁾는 탄성영역에서 섬유의 형태(원형, 타원형)에 따라 응력분포 및 응력집중을 연구했으며, 원형 단면의 사각배열에서 종방향 전단계수를 수치해석하여, Hashin-Rosen의 식과 비교했다. 그의 연구에서 육각배열은 사각배열보다 낮은 전단계수의 값을 보였다. 즉 원형 단면의 섬유에서 사각배열이 육각배열보다 배열효과가 뛰어난을 알 수 있다.

최근 Brockenbrough⁽¹⁰⁾는 연속섬유가 보강된 6061 알루미늄에서 수치해석방법을 통하여 섬유의 형태 및 분포에 따른 응력분포와 변형에 대한 체계적인 연구를 행하였다. Kondo 등⁽¹¹⁾은 섬유가 한 방향으로 배열된 2상 복합재료에서 섬유배열이 사각, 육각, 불규칙일 때 섬유체적비에 따른 종방향 전단계수를 연구했다. 역시 사각배열이 육각배열보다 종방향 전단계수가 크게 나타났으며, 체적비가 증가할수록 그 차이가 커짐을 보였다. 이것은 Adams⁽⁹⁾의 결론과 일치함을 보였다. 또한, 유리/에폭시($G_f/G_m=20$), 보론/에폭시($G_f/G_m=120$)의 실험결과와 비교하였다. 여기서, G_f 는 섬유의 전단계수이며, G_m 은 기지의 전단계수이다.

본 연구는 2상 복합재료에서 섬유의 형상 및 배열 그리고 체적비 변화에 따른 보강재의 상호작용이 복합재료의 전단응력에 미치는 영향 및 지지 내의 응력분포를 해석했다. 또한 순수 전단력을 측정할 수 있는 IST(Iosipescu Shear Test)를 이용하여 탄소/에폭시 시험편의 결과와 비교하였다. 이와 같이 궁극적으로 이상화된 섬유의 형상 및 완전히 규칙적인 배열의 유한요소해석 모델을 통하여 거의 불규칙한 실제 복합재료의 거동 및 응력전달과정을

예상할 수 있으며, 섬유분포에 따른 복합재료 전체의 기계적 성질을 최적화할 수 있는데 의의가 있다.

2. 이론해석

2.1 기본 모델 및 단위격자 해석

Fig. 2는 이론 및 수치해석에 사용된 기본모델을 나타낸 것이다. x , y 방향은 횡방향이며, z 방향은 종방향, 즉 섬유방향이다. 보강된 섬유의 형태는 원형(circle), 육각형(hexagon), 사각형(rectangle)

이며, 이 모델을 CHR모델이라 명한다. 배열은 사각배열에서 인접한 섬유와 상호작용을 고려하지 않은 형태(cell-0)와 수직방향으로 인접한 섬유와 상호작용을 고려한 형태(cell-1) 및 육각배열(cell-2)의 형태로 한다.

Fig. 3은 이론해석에 사용된 단위격자 모델을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 규칙적인 사각배열에서 섬유 단면을 원형, 육각형, 사각형의 형태를 취한다. 섬유방향(z 방향)의 길이를 단위길이라고 하며, 인접한 섬유와 섬유 중심 사이의 거리를 a 로 한다. 본 이론해석에 사용된 가정은 (1) 섬유와 기

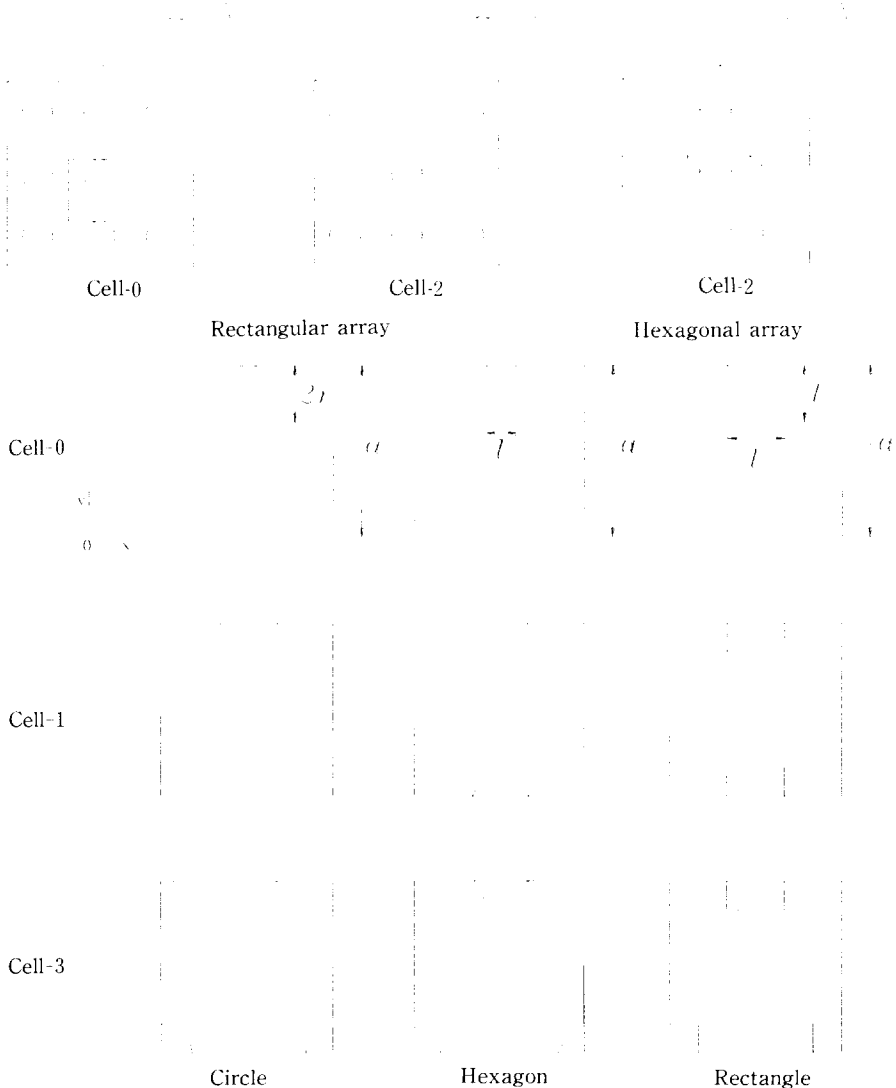


Fig. 2 Schematics of analysis model for different types of array and geometry

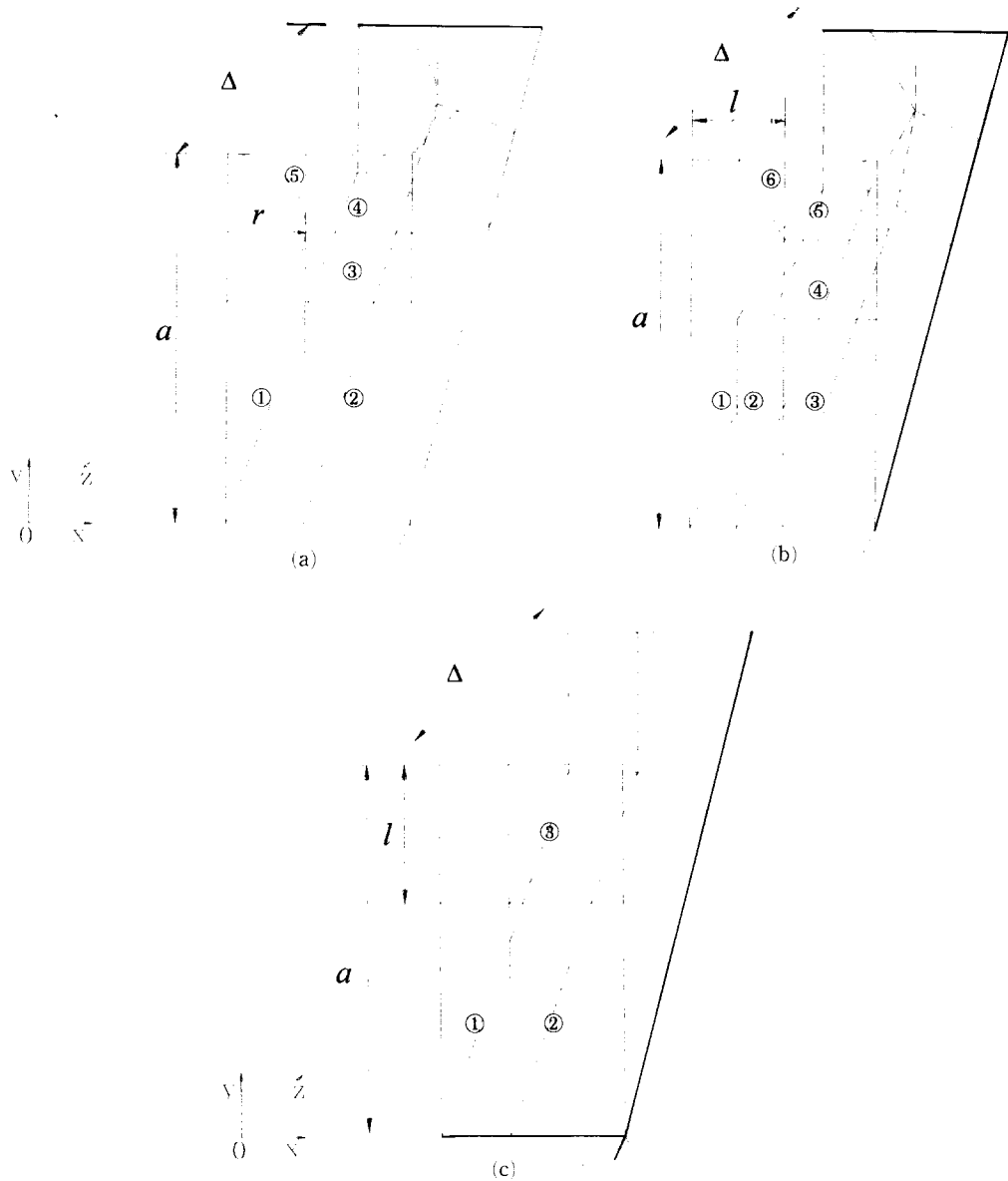


Fig. 3 Theoretical analysis model of unit cell subjected to longitudinal shear loading with fiber geometry

지 사이는 완전한 접촉이고, (2) 기지는 균질한 탄성 거동, 섬유는 강체로 보며, (3) 기지 속의 섬유는 균일한 분포이다. 섬유의 형상에 따른 단위격자의 모델에서 $y=0$ 인 면을 구속시키고 $y=a$ 인 면에 섬유방향으로 전단변위(Δ)를 가할 때 발생하는 변형에너지의 관계식으로부터 연속섬유강화 2상 복합재료의 종방향 전단계수를 예상할 수 있다.

탄성체내의 변형에너지는

$$U = \frac{1}{2} \int_v \sigma_{ij} \gamma_{ij} dv \quad (1)$$

또한 기하학적 적합조건에서 모델의 종방향 전단 변형률은

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

여기서, $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$, u, v, w 는 x, y, z 방향의 변형량이다.

유일한 전단변형률 요소는 γ_{yz} 이고, 아래와 같이 표현된다.

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta}{a} \tag{3}$$

보강되는 섬유단면이 원형, 육각형, 사각형인 2상 복합재료의 단위격자내의 평균 변형에너지는

$$u_0 = \frac{1}{2} \gamma_{yzavg}^2 G_{yzavg} \tag{4}$$

여기서, $\gamma_{yzavg} = \left(\frac{\Delta}{a}\right)$ 이며, a 는 단위격자 모델의 한 변의 길이이다.

식 (4)에서 각각의 섬유 단면에서 평균 변형에너지를 구하므로서 종방향 전단계수를 예측할 수 있다.

2. CHR 모델의 해석

2상 복합재료는 섬유 상과 기지 상으로 구성되어 있으며 계면은 완전한 결합인 모델을 기본으로 한다. 본 모델의 종방향 전단계수를 결정은 섬유와 기지의 물성치비(modulus ratio)가 크기 때문에 기지 상에 의해 지배를 받을 것으로 예상할 수 있다. 이에 의해 보강되어지는 섬유를 강체로 가정할 수 있다. 해석상 발생하는 전단변형은 섬유에서 발생하지 않으며 기지 부분에서만 발생한다. 섬유의 형상에 따라 해석의 정확성을 위해 Fig. 3과 같이 기지 부분을 몇 개의 부분으로 나누어 해석할 경우에 발생하는 전체의 평균 종방향 전단변형은 아래와 같다.

2.1 원형 단면섬유

Fig. 3(a)에서 원형 섬유의 반지름이 r 일 때 기지의 각 부분에 발생하는 전단변형률은

- ① 부분 $\gamma_{1yz} = \left[\frac{1}{(a-r) - \sqrt{r^2 - x_i^2}} \right] \Delta$
- ② 부분 $\gamma_{2yz} = \left[\frac{(2a-r)}{2a(a-r)} \right] \Delta$
- ③ 부분 $\gamma_{3yz} = \left[\frac{(2a-r)}{2a(a-r)} \right] \Delta$
- ④ 부분 $\gamma_{4yz} = \left[\frac{1}{2a} \right] \Delta$

$$\textcircled{5} \text{ 부분 } \gamma_{5yz} = 0 \tag{5}$$

여기서, $i=1, 2, 3, \dots, n, 0 \leq x_i \leq r$

① 부분은 Fig. 3(a) 처럼 Δy 가 x 방향에 따라 변하기 때문에 전단변형률을 함수화 하였다. 여기서 n 은 x 방향으로 섬유의 반경까지 등분한 갯수이다. 모델에 저장된 변형에너지는

$$U_0 = \frac{1}{2} G_m [2(\gamma_{1yz})^2 dV_1 + 2(\gamma_{2yz})^2 dV_2 + 2(\gamma_{3yz})^2 dV_3, \dots] \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)에서 섬유방향으로 전단변위(Δ)을 가할 경우 발생하는 변형에너지는

$$U_0 = \frac{1}{2} G_m \Delta^2 \left[2 \sum_{x_i=0}^r \left(\frac{1}{a-r - \sqrt{r^2 - x_i^2}} \right) \frac{r}{n} + \frac{1}{4} \left(\frac{(2a-r)(a-2r)}{a(a-4)} \right)^2 + \frac{1}{4} (a-2r) R \left\{ \left(\frac{(2a-r)}{a(a-r)} \right)^2 + \left(\frac{1}{a} \right)^2 \right\} \right] \tag{7}$$

또한 단위체적에 저장된 변형에너지는 아래와 같다.

$$u_0 = \frac{U_0}{a^2} \tag{8}$$

그러므로, 식 (4)와 식 (8)의 관계에서 평균 종방향 전단계수(G_{avg})를 구할 수 있다.

$$G_{avg} = G_m \left[2 \sum_{x_i=0}^r \left(\frac{1}{a-r - \sqrt{r^2 - x_i^2}} \right) \frac{r}{n} + \frac{1}{4} \left(\frac{(2a-r)(a-2r)}{a(a-4)} \right)^2 + \frac{1}{4} (a-2r) r \left\{ \left(\frac{(2a-r)}{a(a-r)} \right)^2 + \left(\frac{1}{a} \right)^2 \right\} \right] \tag{9}$$

여기서, r 은 섬유반경이고 a 는 모델 한변의 길이이다.

한편, 이론적 해석에서 원형 단면의 섬유가 보강된 복합재료의 전단계수를 결정하는 식을 보면, 육각배열에서 섬유단면이 원형에 대해 종방향 전단계수를 해석한 Hashin-Rosen의 식은 다음과 같다.

$$\frac{G_{avg}}{G_m} = \frac{(G_f + G_m) + (G_f - G_m) \nu_f}{(G_f + G_m) - (G_f - G_m) \nu_f} \tag{10}$$

여기서, G_m 은 기지의 전단계수이고, G_f 는 섬유의 전단계수이다.

위의 식은 규칙적인 육각배열에서 섬유단면이 원

형일 때 평균 종방향 전단계수를 나타내는 식이다. 본 이론적 해석에서 규칙적인 사각배열일 때 원형 단면에서 유도된 식 (9)와 Hashin-Rosen의 식 (10)과의 관계로부터, 섬유단면이 원형일 때 섬유 배열에 따라 섬유체적비와 종방향 전단계수의 관계를 알 수 있다. 이것의 비교는 결과 및 토의에 언급되어 있다.

2.2 육각형 단면섬유

Fig. 3(b)에서 보강되는 섬유의 한 변의 길이가 l 인 육각형섬유가 보강된 경우 이론적 해석방법은 단면이 원형인 경우와 같다.

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \text{ 부분 } \gamma_{1,yz} &= \left[\frac{1}{a-\sqrt{3}l} \right] \Delta \\
 \textcircled{2} \text{ 부분 } \gamma_{2,yz} &= \left[\frac{4}{4a-3\sqrt{3}l} \right] \Delta \\
 \textcircled{3} \text{ 부분 } \gamma_{3,yz} &= \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{2a-\sqrt{3}l} \right] \Delta \\
 \textcircled{4} \text{ 부분 } \gamma_{4,yz} &= \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{2a-\sqrt{3}l} \right] \Delta \\
 \textcircled{5} \text{ 부분 } \gamma_{5,yz} &= \left[\frac{1}{2a} \right] \Delta \\
 \textcircled{6} \text{ 부분 } \gamma_{6,yz} &= 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

식 (6)과 식 (11)의 관계에서 섬유단면이 육각형인 경우 평균 종방향 전단계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 G_{h \text{ avg.}} &= G_m \left[\left(\frac{l}{a-\sqrt{3}l} \right) + \left(\frac{4l}{4a-3\sqrt{3}l} \right) + \frac{1}{2} (a-\sqrt{3}l) \left(\frac{a-l}{2} \right) \left(\frac{1}{2a} + \frac{2}{2a-\sqrt{3}l} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{3}l \left(\frac{a-l}{2} \right) \left\{ \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{2a-\sqrt{3}l} \right)^2 + \frac{1}{4a^2} \right\} \right]
 \end{aligned} \tag{12}$$

2.3 사각형 단면섬유

Fig. 3(c)에서 단위격자 섬유 한변의 길이가 l 인 사각형섬유가 보강된 경우 이론적 해석방법은 단면이 원형인 경우와 같다.

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \text{ 부분 } \gamma_{1,yz} &= \left[\frac{1}{a-l} \right] \Delta \\
 \textcircled{2} \text{ 부분 } \gamma_{2,yz} &= \left[\left(1 - \frac{1}{2a} \right) \left(\frac{1}{a-l} \right) \right] \Delta \\
 \textcircled{3} \text{ 부분 } \gamma_{3,yz} &= \left[\frac{1}{2a} \right] \Delta
 \end{aligned} \tag{13}$$

식 (6)과 식 (13)의 관계에서 섬유단면이 사각형인

경우 평균 종방향 전단계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{r \text{ avg.}} = G_m \left[\left(\frac{l}{a-l} \right) + \left(1 - \frac{l}{2a} \right)^2 + \frac{l(a-l)}{4a^2} \right] \tag{14}$$

섬유단면이 사각형, 육각형, 원형인 연속섬유강화 2상 복합재료의 종방향 전단계수는 탄성체내에 발생되어지는 변형에너지의 관계식으로부터 식 (9), 식 (12), 식 (14)의 이론 식을 유도할 수 있다. 유도된 식에서 한방향 연속섬유강화 2상 복합재료의 종방향 전단계수는 해석상 모델에서 길이의 차원(a, l, r)으로 표현된다. 즉, 2상 복합재료의 기본적인 물성치중의 하나인 종방향 전단계수는 기지의 전단계수와 섬유체적비의 관계로 표현된다.

3. 수치해석

3.1 모델 및 수치해석

본 연구에서 한방향 연속섬유강화 2상 복합재료의 모델에서 섬유형상과 분포의 영향을 검토하기 위한 수치해석에 사용된 섬유의 탄성률(E_f)은 125 GPa이며, 기지의 탄성률(E_m)은 2.99 GPa이다. Fig. 2에서 보강되는 섬유의 형태는 이론 해석에서와 같이 원형, 육각형, 사각형으로 하며, 배열은 사각배열, 육각배열로 한다. 또한, 섬유방향은 z 방향인 하나의 단위격자 개념으로 정의한다. 섬유의 크기는 섬유체적비(v_f)에 따라 변하기 때문에 단위격자 모델의 크기를 고정하고 섬유단면의 크기를 변화시키는 방법으로 체적비에 따른 모델을 해석하였다.

3.2 경계조건

본 모델에서 규칙적인 사각배열과 육각배열의 각각의 단위격자에서 경계조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 y=0 \text{에서 } u=v=w &= 0 \\
 y=a \text{에서 } u=v &= 0, \quad w=w(x, y)
 \end{aligned} \tag{15}$$

여기서, u, v, w 는 x, y, z 방향의 변형량이다.

수치해석에서 보강되는 섬유의 형상이 다르기 때문에 유한요소해석에 변위를 구속시키는 방법을 택했다. 해석상 변위 구속은 단위격자 모델에서 섬유체적비에 따라 섬유단면의 크기가 변하기 때문에 하중을 구속시키는 방법보다 정확하게 해석이 가능

하다. 섬유체의 체적비는 10, 20, 30, 40%로 하며 각각의 섬유체적비(v_f)에서 변위간격은 $w=0.0005$ mm, 0.001 mm, 0.002 mm, 0.005 mm, 0.008 mm, 0.01 mm, 0.015 mm로 한다. 즉, 변형률은 1.5% 내에서 탄성거동을 하며 변형하는 동안 섬유와 기지는 각각 선형 탄성체 및 등방성체로 한다. 또한 섬유와 기지의 계면은 완전한 결합으로 한다. 수치해석에 사용된 모든 모델은 2차원이며, 유한요소 메시는 8-절점의 $n \times n \times 1$ 배열로 구성된 쉘 형태(shell type)이다. 응력과 변형률을 얻기위한 수치해석은 ANSYS 5.0⁽¹²⁾을 사용했다. 여기서, 종방향 전단계수는 아래의 식에 의해 결정된다.

$$G_{avg.} = -\frac{\sigma_{yz}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{b}} \quad y=b, \quad 0 \leq b \leq a \quad (16)$$

여기서, n 은 절점의 개수, w_i 는 z 방향의 변형량이다.

본 연구에 사용된 모델의 수치해석을 통하여 얻은 한방향 연속섬유강화 2상 복합재료의 종방향 전단계수를 탄성체의 변형에너지의 관계로부터 얻은 이론적 해(식 (9), 식 (12), 식 (14))와 비교 분석하였다.

4. 실험

실험적 방법으로 2상 복합재료의 종방향 전단계수 예측에 사용된 재료에서 기지는 상온 에폭시(경도화성 : JEC-880)이며, 섬유는 탄소섬유(태광산업 : Acelan carbon fiber TZ-307)를 사용했다. 탄소섬유의 탄성계수는 235 GPa이며 섬유 한개의 직경은 $6.8 \mu\text{m}$ 이다. 시험편 제조는 섬유를 한방향으로 불규칙적으로 감은 후 경화제와 5:1로 배합한 에폭시를 부어 70°C에서 1시간 동안 전기로에서 경화시킨 후 기포를 완전히 제거한 후 시험편으로 사용했다. 시험편 가공시 기지와 섬유의 계면파괴와 시험편의 미소균열을 방지하기 위해 냉각수가 보급되는 다이아몬드 날이 있는 절단기를 사용했다. 시험편의 크기는 $22 \times 6 \times 75$ mm(폭×두께×길이)이며, 시험편의 중심에 시험편 높이의 20%의 90° 노치를 주었다. 시험편은 섬유 체적비가 9%, 21%인 시험편을 사용했다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 시험편의 형상 및 시험기를 나타냈다. 시험기는 순수 전단력을 측정할 수 있는 IST(Iosipescu Shear Test) 방법^(13,14)을 이용하여 전단력을 측정할 수 있

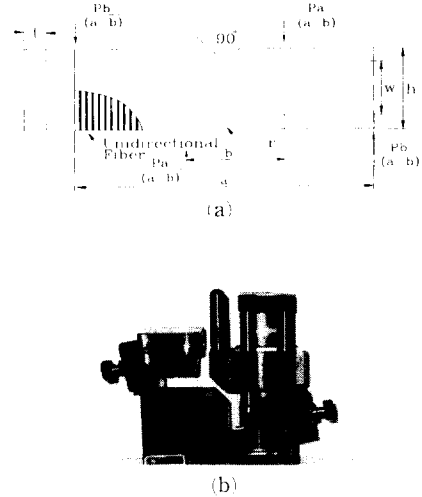


Fig. 4 Specimen geometry (a) and modified Iosipescu test fixture (b)

는 시험장비를 제작하였다. 시험방법은 IST 시험기를 인장시험기(Shimadzu Autograph)의 하중 중심에 일치시킨 후 시험편을 IST 시험기에 장착한 다음 하중을 가한다. 크로스헤드(crosshead)의 속도는 0.1 mm/min로 했다. 또한 스트레인 게이지를 ±45로 부착했다. 가해진 하중은 인장시험기에 식 결정되며, 인장시험기에 Multichanne(Model AS 1302, NEC San-ei Instruments, Ltd)을 연결하여 변형률을 측정했다. 전단응력과 전단변형률은 아래의 식에서 결정되며, 응력과 변형률 관계에서 종방향 전단계수를 결정할 수 있다.

$$\tau_{avg.} = \frac{P}{wt}, \quad \gamma_{avg.} = |\epsilon_{+45} - \epsilon_{-45}|$$

$$G_{avg.} = \frac{\tau_{avg.}}{\gamma_{avg.}} \quad (17)$$

5. 결과 및 토의

Fig. 5는 IST 실험결과에서 얻어진 전형적인 전단 응력과 전단변형률곡선이다. 각각의 조건에서 5개의 시험편을 실험하였다. 일반적으로 에폭시만의 응력과 변형률곡선은 거의 일정함을 보였으나, 섬유체적비가 9%, 21%인 탄소섬유/에폭시 시험편의 곡선은 그림과 같이 약간의 차이를 보였다. 이것은 각각의 실험시에 하중 중심과 시험편 중심을 일치시키는 것과 시험편 제조시 탄소섬유를 종방향으로 정확하게 수직되게 제조하는 것, 또한 시험편의 제

Table 1 Longitudinal shear modulus of carbon fiber-reinforced composites

Specimen No. \ v_f (%)	0	9	21
1	1.183004 GPa	1.417072 GPa	1.726374 GPa
2	1.193148 GPa	1.472496 GPa	1.773583 GPa

작시 재료의 불균일성때문이라고 본다. Table 1은 Fig. 5에 나타난 대표적인 2개의 전단응력과 전단 변형률곡선에서 계산된 종방향 전단계수를 나타냈 으며, 각 시험편의 오차는 최대 3%이다.

Fig. 6은 탄소/에폭시 복합재료 시험편을 종방향 으로 전단력을 가하여 파괴시킬 때 파괴면의 SEM (Scanning Electron Microscope) 사진을 나타낸 것이다. (a)는 섬유방향으로 기지 자체의 파괴와 섬유/기지 계면의 전단파괴현상을 보였으며, 기지 재료의 판단면은 물결무늬현상을 보였다. (b)는 파괴의 다양한 현상을 보였다. 기지내의 파괴, 섬

유 자체의 파손, 섬유의 뽑힘(pull-out) 및 섬유와 기지의 계면파괴 등 다양한 파괴현상을 보였다. 또 한 섬유와 기지 사이의 비소기공도 보였으며, 이것 은 섬유/기지 사이의 전단 파괴를 촉진시키며 전단 계수를 저하시키는 원인이 된다. 기지와 기지 사이의 약한 결합력으로 섬유의 미끄럼 및 계면파괴현 상이 나타났다. 이와 같이 섬유와 기지의 계면 결 합력은 종방향 전단계수 결정에 중요한 영향을 미 침을 보였다. 연속섬유 복합재료의 최적의 복합재 로 제작을 위해 기지/섬유 계면의 계면 결합력을 증진시키는 계면 강도에 대한 연구가 계속되어야 한다.

미시적 관점에서 2상 복합재료의 단위격자 모델 해석은 탄성영역내에서 응력과 변형률의 관계를 좀 더 정확하게 추정할 수 있다. 유한요소해석을 이용 한 응력과 변형률의 관계식에서 평균 종방향 전단 계수를 예상할 수 있었다. 또한, 변형에너지와 응 력-변형률의 관계식으로부터 규칙적인 사각배열에 서 각각의 단면에 대한 이론적으로 종방향 전단계 수를 식 (9), 식 (12), 식 (14)에서 예상하였다.

Fig. 7은 규칙적인 사각배열에서 각각의 단면에

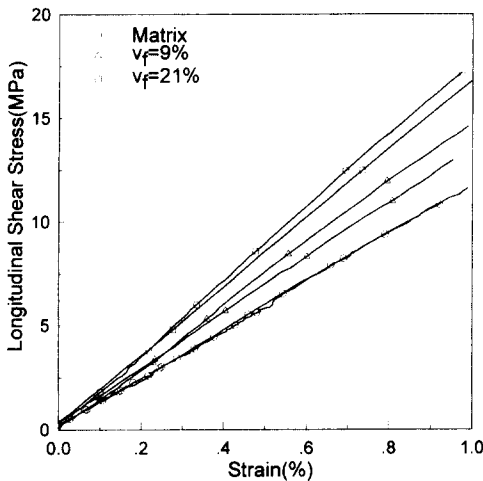


Fig. 5 The typical stress-strain curves for the tested samples

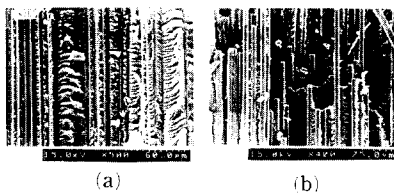


Fig. 6 SEM of typical fracture surface for carbon fiber reinforced composites under longitudinal shear loading

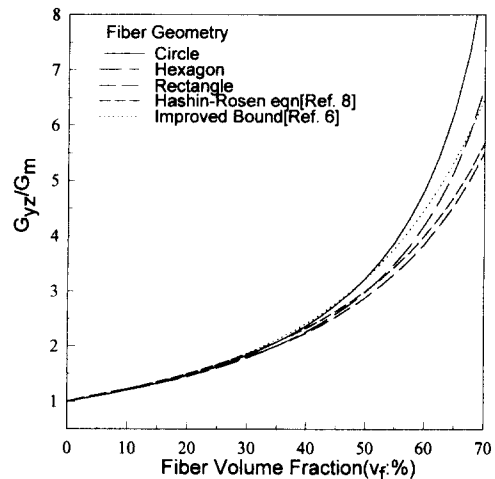


Fig. 7 Theoretical predictions of longitudinal shear modulus ratio

대해 2상 복합재료의 종방향 전단계수의 이론치를 섬유의 체적비에 따라 나타낸 것이다. 낮은 섬유의 체적비(30% 미만)에서 종방향 전단계수의 크기는 사각형, 원형, 육각형 단면 순으로 나타났으나, 그 차이는 매우 적었다. 그러나, 체적비(40%이상)가 증가할수록 원형, 육각형, 사각형 단면 순으로 큰 차이를 크게 나타냈다. 이것은 섬유 체적비 따라 종방향 전단계수를 결정하는데 섬유단면의 형상이 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

또한, 수직방향으로 인접한 섬유와 상호작용을 고려한 형태(cell-1)에서, 일정한 섬유의 체적비에서 섬유단면이 사각형 단면일 때 단위격자의 중심선상($x=a/2$)에서 수직방향으로 섬유의 길이가 l 이면 단면이 원형인 경우 1.1284 l , 단면이 육각인 경우 1.0746 l 이었다. 모델내의 섬유와 섬유 사이의 거리, 즉 기지의 길이가 원형단면이 가장 짧고 사각형 단면이 가장 길다. 이와 같이 기지길이로만 예상할 경우 평균 종방향 전단계수의 크기는 섬유단면이 원형, 육각형, 사각형 순임을 예상할 수 있다. 또한 Fig. 7의 결과와 비교해서 높은 체적비에는 잘 일치하나, 체적비(10%)가 낮을 때 일치되지 않음을 보였다. 이것은 섬유의 체적비가 낮을 때는 각각의 단면의 형상에서 섬유 주위의 응력분포 및 섬유에서 기지로 응력전달 등이 중요한 작용을 함을 예상할 수 있다. 그래서 수치해석의 결과와 비교 해석할 수 있으며 그의 결과는 Figs. 8, 9, 10에 나타났다.

섬유형상에 따른 종방향 전단계수의 비교에서

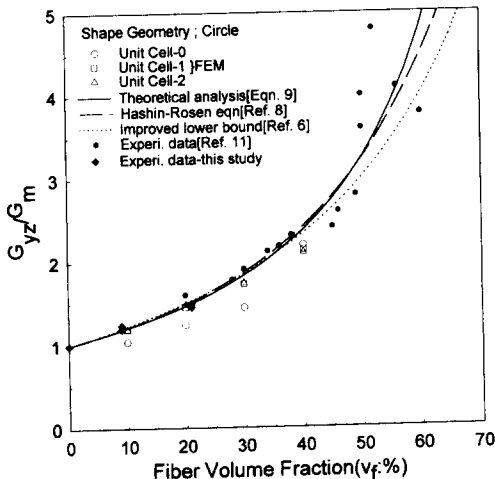


Fig. 8 $G_{yz}-v_f$ relation for circular shape of fiber

Fig. 8은 단면이 원형인 경우의 수치해석 및 이론해를 비교한 것이다. 섬유의 체적비가 30%이하에서 이론 및 수치해석 해는 육각배열이 사각배열보다 종방향 전단계수가 약간 크게 나타났다. 그러나, 체적비가 증가할수록 사각배열일 때 종방향 전단계수가 더욱 더 증가함을 알 수 있었다. 또한, 사각배열일 때 이론적 해(식 9)와 육각배열일 때 이론해인 Hashin-Rosen의 해(식 10)는 수치해석에서 구한 종방향 전단계수의 해와 정성적(定性的)으로는 근사됨을 보였다. 또한, 섬유의 체적비가 30%이하에서 Cell-0 모델의 유한요소의 값이 다른 단위격자의 모델에 비해 작은 값을 보였다. 이것은 Cell-0에서 육각형과 사각형과 달리 원형은 하중을

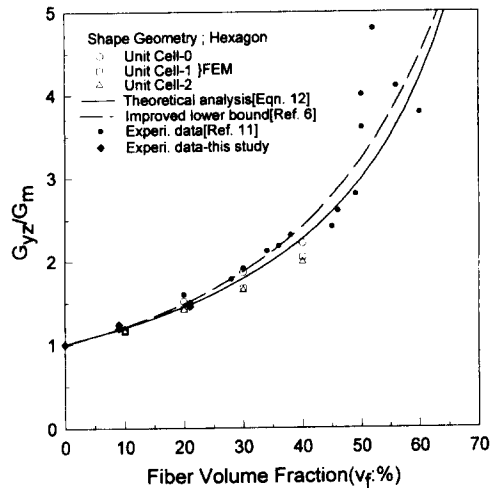


Fig. 9 $G_{yz}-v_f$ relation for hexagonal shape of fiber

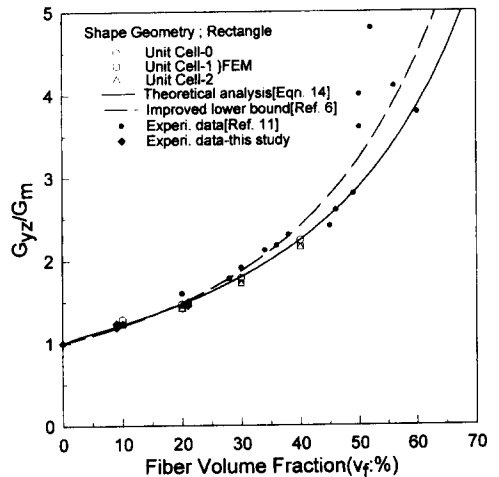


Fig. 10 $G_{yz}-v_f$ relation for rectangular shape of fiber

가하는 점이 한 점이기 때문에 모델의 기하학적 형상오차임을 예상할 수 있다. Fig. 9에서 단면이 육각형인 경우, 섬유의 체적비에 관계없이 사각배열이 육각배열보다 종방향 전단계수가 크게 나타났다. Fig. 10에서 단면이 사각형인 경우는 다른 단면에 비해 사각배열일 때 종방향 전단계수가 약간 크게 나타났다. 이것은 단면이 사각인 경우 수치해석 해를 통하여 배열에 따른 효과가 적음을 알 수 있다. 또한, 다른 단면에 비해 이론 해와 수치해석의 값이 잘 일치됨을 보였다.

Figs. 8, 9, 10에 섬유체적비가 9%, 21%인 탄

소/에폭시 시편의 종방향 전단계수의 실험결과를 나타냈으며, 본 이론해의 결과와 잘 일치함을 보였다. 또한 Kondo의 문헌⁽¹¹⁾에서 유리/에폭시($G_f/G_m=20$)가 불규칙적으로 배열된 시편의 종방향 전단계수의 실험데이터를 나타냈다. 이론 및 수치해석의 결과는 실험데이터와 잘 근사됨을 보였다. 또한 Nomura⁽⁶⁾의 아래 경계영역(lower bound)과 비교에서 각각의 단면에서 구한 이론해와 낮은 섬유체적비에서 근사됨을 보였다.

Figs. 11, 12는 각각의 단면에 대해 규칙적 사각배열(cell-1)의 모델에서 z방향, 즉 섬유방향으로

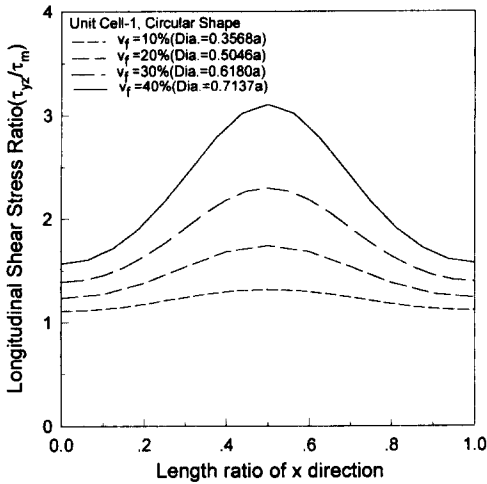


Fig. 11(a) Shear stress distribution for circular shape at $y=a/2$ of unit cell-1

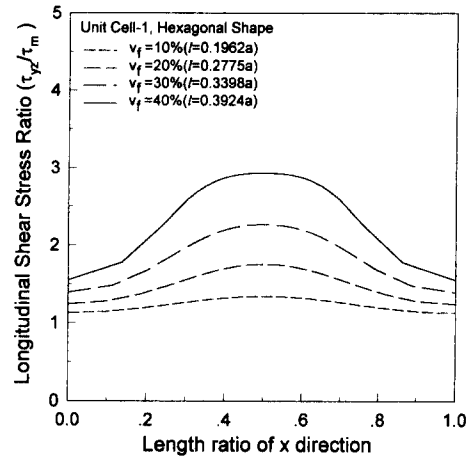


Fig. 11(b) Shear stress distribution for hexagonal shape at $y=a/2$ of unit cell-1.

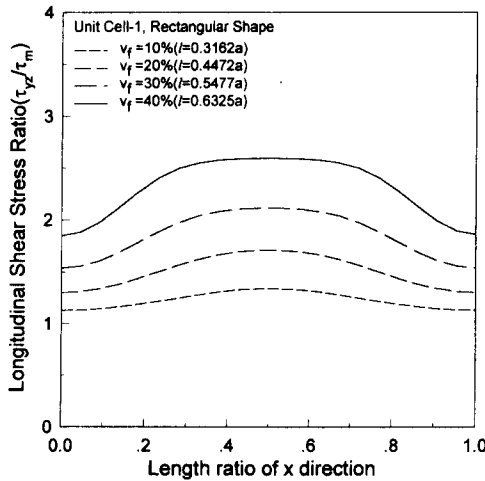


Fig. 11(c) Shear stress distribution for rectangular shape at $y=a/2$ of unit cell-1.

종방향으로 전단변위 w 를 0.01 mm로 할 때 섬유 단면의 수직방향 즉 $y=a/2$ 에서 단위격자의 x 방향으로 발생하는 종방향 전단응력분포를 나타냈다. Fig. 11(a)는 섬유의 단면이 원형인 경우 단위격자 모델의 수평방향, 즉 x 방향에 따라 낮은 체적비 ($v_f=10\%$)에서 응력분포의 차이가 적었다. 그러나, 체적비 증가에 따라 섬유의 중심($x=0.5$ mm)에 근접할수록 응력분포 값이 급격히 증가함을 보였다. 이것은 체적비가 증가할수록 수직방향으로 인접한 섬유 사이의 상호작용 및 응력 전달이 잘 됨을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 단면이 육각형인 경우이며 섬유의 체적비가 증가할수록 섬유 중심 근방에서 응력 증가가 원형 단면에 비해 둔화되는 현상을 보였다. Fig. 11(c)는 단면이 사각형인 경우 낮은 체적비에는 원형, 육각형 단면과 비슷한 응력 분포를 보였으나, 체적비가 증가할수록 섬유 중심 근방에서는 다른 단면에 비해 낮은 응력분포의 값이지만, 균일한 응력분포를 보였다. Fig. 11(a), (b), (c)의 결과에서 각각의 섬유의 단면에 대해 체적비가 낮은 경우 응력분포 선도가 거의 비슷한 경향을 보였다. 그러나 보장되는 섬유체적비가 증가하는 경우, 섬유의 중심 근방에서의 응력분포 값은 원형 단면, 육각형 단면, 사각형 단면 순으로 나타났다.

Fig. 12는 각각의 단면에 대해 섬유의 체적비가 10%, 30%일 때의 응력분포를 나타냈다. 섬유체적비가 10%에서는 섬유의 단면이 육각, 원형단면에 비해 사각 단면이 수평방향으로 응력 전달이 잘 이루어짐을 보였으며, 응력분포가 대체적으로 높게 나타났다. 이것은 낮은 섬유체적비(10%)에서 사각형 단면이 평균 종방향 전단계수가 높게 나타남을 예상할 수 있다. 또한, 섬유체적비가 30%에서 사각형 단면은 다른 단면에 비해 섬유의 중심($x=a/2$)에서 멀어질수록 높은 응력분포 값을 보였으나, 섬유의 중심에 가까울수록 원형 단면이 가장 높은 응력분포 값을 보였다. Figs. 11, 12의 결과에서 평균 종방향 전단계수를 결정하는 것은 섬유체적비가 작을 경우 각각의 단면에 대해 섬유의 중심선($x=0.5$ mm)상에서 수직방향으로 섬유의 길이에 비해 기지의 길이가 길기 때문에 섬유와 섬유의 상호작용으로 인한 영향, 즉 지지길이의 영향보다는 각각의 형상에 대해 섬유에서 기지로 전달되는 응력분포에 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 그러나 체적비가 증가할수록 낮은 섬유 체적비에 비해 섬

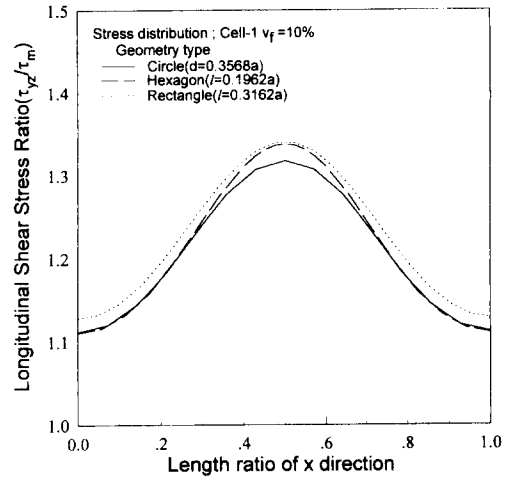


Fig. 12(a) Longitudinal shear stress distribution for different fiber geometry types at $y=a/2$ of unit cell-I. ($v_f=10\%$)

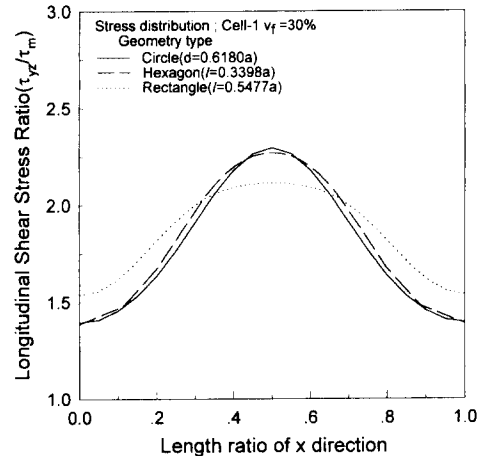


Fig. 12(b) Longitudinal shear stress distribution for different fiber geometry types at $y=a/2$ of unit cell-I. ($v_f=30\%$)

유와 섬유 사이의 길이, 즉 지지 길이가 짧기 때문에 섬유단면의 형상보다는 지지 길이가 종방향 전단계수를 결정하는 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다.

5. 결 론

연속섬유강화 2상 복합재료의 섬유형상 및 배열에 따른 종방향 전단계수를 이론 및 유한요소해석으로 예측하여 탄소/에폭시의 실험결과와 비교 검

토하였다. 각각의 단면에 대한 이론 및 수치해석을 통하여 수직방향으로 인접한 섬유가 보강된 사각배열의 모델(Cell-1)이 육각배열의 모델(Cell-2)보다 종방향 전단계수가 크게 나타났다. 낮은 섬유체적비에서는 사각형 단면이, 체적비가 증가할수록 원형 단면이 높은 종방향 전단계수를 보였다. 또한, 사각배열(Cell-1)에서 단위격자의 응력분포 선도의 해석을 통하여 낮은 섬유의 체적비에서는 각각의 섬유형상에 대해 섬유에서 기지로 응력전달이, 섬유의 체적비가 증가할수록 수직방향으로 인접한 섬유와 섬유 사이의 길이가 연속섬유강화 복합재료의 물성치 결정에 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 이와 같이 섬유 단면의 형상 및 배열은 복합재료의 물성치를 결정하는데 중요한 인자로 작용한다. 또한, 본 논문의 이론치와 탄소섬유/에폭시의 IST 실험결과 및 기존 문헌의 실험적 데이터¹¹⁾와 낮은 섬유체적비에서 근사됨을 보였다.

참고문헌

- (1) Ravichandran, K. S., 1994, "A Simple Model of Deformation Behavior of Two Phase Composites," *Acta Metall. Mat.*, Vol. 42, pp. 1113~1123.
- (2) Chen, P. E. and Lin, J. M., 1969, "Transverse Properties of Fibrous Composites," *Mater. Res. Std.*, Vol. 9, pp. 29~33.
- (3) Prewo, K. M. and Kreider, K. G., 1973, "Boron Reinforced Aluminum Systems," *Materials Tech. Series*, Vol. 6, pp. 38~52.
- (4) Shen, Y. L., Finot, M., Needleman, A. and Suresh, s., 1994, "Effective Elastic Respoonse of Two-Phase Composites," *Acta Metall. Mat.*, Vol. 42, pp. 77~97.
- (5) Chou, T. W., Nomura, S. and Taya, M., 1980, "A Self-Consistent Approach to the Elastic Stiffness of Short-Fiber Composites," *J. Comp. Mat.*, Vol. 14, pp. 178~188.
- (6) Nomura, S. and Chou, T. W., 1980, "Bound of Effective Thermal Conductivity of Short Fiber Composites," *J. Comp. Mat.*, Vol. 14, pp. 120~129.
- (7) Ward, I. M. and Wilczynski, A. P., 1993, "Bounds for the Elastic Constants of a Unidirectional Fibre Composite : A New Approach," *J. Mat. Sci.*, Vol. 28, pp. 1973~1977.
- (8) Hashin, Z. and Rosen, B. W., 1964, "The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials," *J. Applied Mechanics*, Vol. 31E, pp. 223~229.
- (9) Adams, D. F. and Doner, D. R., 1967, "Longitudinal Shear Loading of Unidirectional Composites," *J. Comp. Mat.*, Vol. 1, pp. 4~17.
- (10) Brockenbrough, J. R. Suresh, S. and Wienecke, H. A., 1991, "Deformation of Metal-Matrix Composites with Continuous Fibers," *Acta Metall. Mat.*, Vol. 39, No. 5, pp. 735~752.
- (11) Kondo, K. and Aoki, T., 1982, "Longitudinal Shear Modulus of Unidirectional Composites," *Progress in Science and Engineering of Composites*, pp. 357~364.
- (12) Peter Kohnke, 1994, *ANSYS User's Manual for Revision 5.0*, Swanson Analysis System, Inc.
- (13) Walrath, D. E. and Adams, D. F., 1983, "The Iosipescu Shear Test as Applied to Composites materials," *Experi. Mech.*, pp. 105~110.
- (14) Wilson, D. W., 1990, "Evaluation of the V-Notched Beam Shear Test Through an Interlaboratory Study," *J. of Composites Technology and Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 131~138.