

〈논 문〉

## 연속섬유가 보강된 3상 복합재료의 종방향 전단계수 해석

정태현\* · 이동주\*\*

(1995년 12월 29일 접수)

### Effective Longitudinal Shear Modulus of Continuous Fiber-Reinforced 3-Phase Composites

Tae Heon Jeong and Dong Joo Lee

**Key Words :** 3-Phase Composite(3상 복합재료), Interphase(계면상), Volume Fraction(체적비), Longitudinal Shear Modulus(종방향 전단계수), Unit Cell(단위격자)

#### Abstract

The effective longitudinal shear modulus(LSM) of continuous composites is studied theoretically and numerically using 3-phase unit cell model. Circular, hexagonal and rectangular shapes of reinforced fiber are considered to predict the shear modulus as a function of elastic modulus of each phase and volume fraction of interphase and reinforced fiber. It is found that rectangular fiber shape in low fiber volume fraction( $v_f < 30\%$ ) and circular fiber shape in high volume fraction( $v_f > 40\%$ ) shows the higher longitudinal shear modulus. Also, the obtained values of LSM for rectangular array and by numerical analysis are higher than those of hexagonal array and by theoretical analysis respectively. The reinforcing effects of interphase are more significant in cases of higher fiber volume fraction and circular fiber shape. Not only the spatial distribution and shape of reinforcing fiber but also the volume of interphase have a pronounced effects on the overall LSM. It is also found that the tangent modulus of 2- and 3-phase polymer matrix composite is insensitive to the shape and distribution of reinforcing fibers.

#### 1. 서 론

연속섬유강화 복합재료의 중요한 물성치 중의 하나인 종방향 전단계수 연구는 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 원형섬유의 육각배열에서 Hashin-Rosen<sup>(1)</sup>은 종방향 전단계수를 이론적으로 예측했으며, 또한 유한요소해석을 다양한 모델이 제시되었다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 모델은 섬유상과 기지상으로 구성된 2상 복합재료(2-phase composites)라 한다. 2상 복합재료에서 섬유형상이 원형, 육각형, 사각

형일 때, 배열이 사각배열, 육각배열에서 종방향 전단계수를 이론 및 수치해석방법으로 예측하였다.<sup>(3)</sup> 그러나 실제 복합재료는 섬유/기지의 계면은 결합력을 증진시키기 위해 표면처리, 섬유의 코팅 등을 하여 섬유와 기지의 계면강도를 증가시킨다. 이것은 미소역학의 관점에서 복합재료는 계면상이 포함된 3상 복합재료로 취급할 수 있다. 이와 같은 관점에서 최근 계면상의 역할 및 계면결합을 증가시키는 방법에 많은 관심 및 연구가 진행되고 있다.<sup>(4~8)</sup>

특히 고분자기지 복합재료(polymer matrix composites)의 경우 재료의 재활용 측면에서 열가소성(thermoplastic) 수지내에 섬유가 보강된 복합재료

\*회원, 영남대학교 기계공학과

에서 다양한 방법을 통하여 계면/계면상이 기계적 물성에 미치는 영향을 해석하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(5~8)</sup> 섬유가 보강된 열가소성 수지 복합재료의 기계적 성질은 섬유의 강도와 물성, 기지의 강도 및 화학적 안정성, 그리고 기지와 섬유의 응력 전달이 되는 계면의 유효한 결합력 등에 의존한다.<sup>(8)</sup> 그러나 복합재료의 제조과정에서 섬유 및 기지가 높은 물성을 가지에도 불구하고 높은 인장강도, 물성치 등 최적의 복합재료 물성을 달성할 수 없었다. 이것은 계면강도 및 결합기구(mechanism) 해석이 분명하지 않기 때문이라고 본다. 섬유의 사이징이나 다양한 표면 처리에 의해 고분자 복합재료의 계면결합에 대한 연구가 지속되어야 한다.

일반적으로 3상 복합재료는 기지상, 높은 강도와 강성을 가지는 섬유상, 그리고 섬유상과 기지상을 연결하는 계면상으로 구성되어 있다. 3상 복합재료의 단위격자 모델에서 계면상을 통한 섬유와 기지의 하중전달 구조 및 응력과 변형률 곡선을 통한 변형을 예측할 필요가 있으며, 최적의 복합재료 설계를 위해 각 상의 체적비 변화에 따르는 역학적 거동을 이해할 필요가 있다.

그래서 본 연구는 복합재료의 미소역학 관점에서 섬유와 기지 사이에 계면이 아닌 임의의 두께를 가진 계면상이 포함된 모델을 통한 물성을 해석하며, 섬유형상 변화에 의한 계면상 형상의 영향, 계면상의 체적비 변화에 따른 종방향 전단계수를 예측하였다. 또한 각 상의 탄성계수비 변화에 따른 종방향 전단계수 변화를 예상하며 2상 복합재료의 이론적 해석 및 IST(Iosipescu Shear Test)<sup>(9)</sup>를 이용하여 탄소/에폭시 복합재료의 실험결과<sup>(3)</sup>와 비교 분석하였다.

## 2. 이론적 모델

한방향으로 연속섬유가 보강된 3상 복합재료의 종방향 전단계수 결정에 사용된 모델은 2상 복합재료 모델을 기본으로 한다. 2상 복합재료의 단위격자 모델에서 보강되는 섬유형상이 원형, 육각형, 사각형에서 종방향 전단계수를 예측했다.<sup>(3)</sup> 섬유방향으로 전단변형률( $\gamma_c$ )를 가할 때 보강되는 섬유를 강체라 가정하여 기지내 발생하는 변형에너지의 식으로부터 섬유단면이 원형, 육각형, 사각형에서 아래와 같이 유도되었다.<sup>(3)</sup>

원형 단면섬유의 경우, 종방향 전단계수는

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

여기서,  $r$ 은 원형섬유의 반지름이다.

육각형 단면섬유의 경우, 종방향 전단계수는

$$G_{n\_avg} = G_m \left[ \left( \frac{l}{a-\sqrt{3}l} \right) + \left( \frac{4l}{4a-3\sqrt{3}l} \right) + \frac{1}{2} (a-\sqrt{3}l) \left( \frac{a}{2} - l \right) \left( \frac{1}{a} + \frac{2}{2a-\sqrt{3}l} \right)^2 + \sqrt{3}l \left( \frac{a}{2} - l \right) \left\{ \left( \frac{1}{2a} + \frac{1}{2a-\sqrt{3}l} \right)^2 + \frac{1}{4a^2} \right\} \right] \quad (2)$$

여기서,  $l$ 은 육각형섬유 한 변의 길이이다.

사각형 단면섬유의 경우, 종방향 전단계수는

$$G_{r\_avg} = G_m \left[ \left( \frac{l}{a-l} \right) + \left( 1 - \frac{l}{2a} \right)^2 + \frac{l(a-l)}{4a^2} \right] \quad (3)$$

여기서,  $l$ 은 사각형 단면 한 변의 길이,  $a$ 는 단위격자 한 변의 길이이다.

최근 복합재료 연구에서 유리 혹은 탄소가 보강된 고분자기지 복합재료의 경우 계면상의 영향에 대한 연구에 많은 관심을 보이며, 연구가 진행되고 있다. 또한 금속기지 복합재료(metal matrix composites) 혹은 세라믹기지 복합재료(ceramic matrix composites)에서는 계면상에 의해 섬유에서 기지로의 응력전달이 물성 결정에 중요한 작용을 한다.<sup>(8)</sup>

본 연구의 3상 복합재료의 종방향 전단계수 해석에 사용된 모델은 Fig. 1에 나타냈다. 이론해석의 기본 개념은 2상 복합재료의 단위격자를 이상화한 3상 단위격자 모델이다. 단위격자 중심에 섬유가 계면상과 기지로 둘러싸여 있으며,  $x$   $y$ 방향은 횡방향이며  $z$ 방향은 종방향, 즉 섬유방향이다. 본 연구의 3상 복합재료 모델에서 섬유/기지 및 응력 전달의 역할을 하는 계면상에서 변형이 발생하며, 섬유방향으로 전단응력,  $\tau_{yz}$ 를 가할 경우 단위격자 모델내에 전단변형량( $w_c$ )이 발생한다. 여기서, 첨자  $c$ 는 복합재료,  $m$ 은 기지상,  $f$ 는 섬유상,  $i$ 는 계면상을 나타낸다. 이러한 복합재료의 전단변형

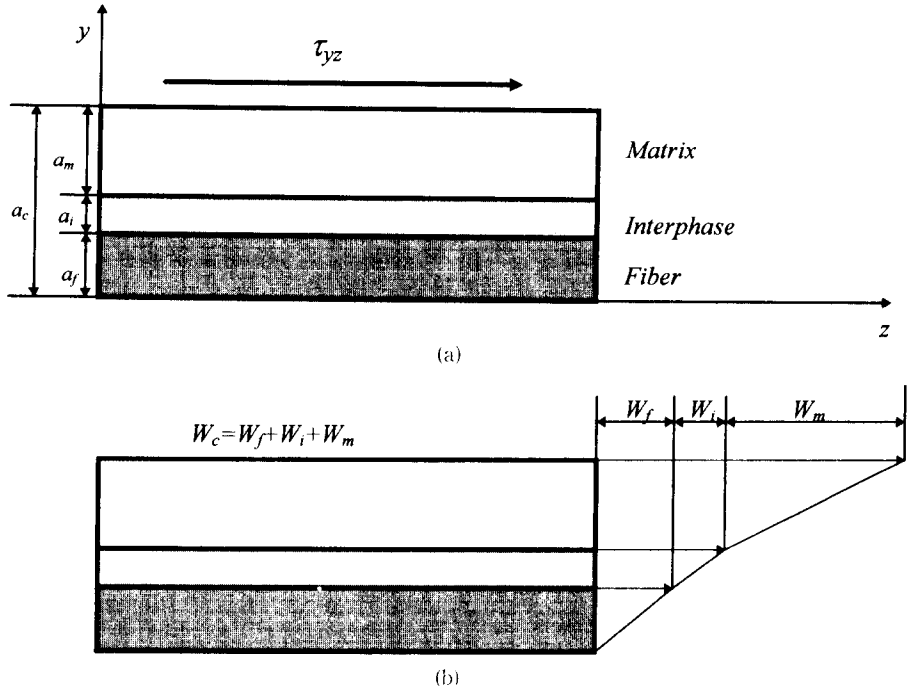


Fig. 1 Schematics of (a) 3-phase composites model and (b) shear deformations

량,  $w_c$ 는 섬유변형량( $w_f$ )과 계면상의 변형량( $w_i$ ) 그리고 기지변형량( $w_m$ )의 합으로 표현된다.

$$w_c = w_m + w_f + w_i \tag{4}$$

또한 각각의 변형량은

$$w_c = \gamma_c a_c, \quad w_m = \gamma_m a_m, \quad w_f = \gamma_f a_f, \quad w_i = \gamma_i a_i \tag{5}$$

여기서,  $\gamma$ 는 변형률,  $a$ 는 각 상 한 변의 길이이다.

식 (4)와 식 (5)의 관계에서 아래와 같이 표현된다.

$$\gamma_c a_c = \gamma_m a_m + \gamma_f a_f + \gamma_i a_i \tag{6}$$

식 (6)에서 단위격자에서 각 상의 형상에 따라 길이비(length fraction)와 각 상 체적비의 관계를 이용하여 계면상이 포함된 3상 복합재료의 종방향 전단변형률을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\gamma_c = \gamma_m v_m + \gamma_f v_f + \gamma_i v_i \tag{7}$$

여기서,  $v_m$ 은 기지상의 체적비,  $v_f$ 는 섬유상의 체적비,  $v_i$ 는 계면상의 체적비를 나타낸다.

또한, 응력과 변형률의 관계에서 식 (7)은 아래

와 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_c}{G_c} = \frac{\tau_m}{G_m} v_m + \frac{\tau_f}{G_f} v_f + \frac{\tau_i}{G_i} v_i \tag{8}$$

혼합규칙(rule of mixture)에서 각 상의 응력분포가 같다고 하면,

$$\frac{1}{G_c} = \frac{1}{G_m} v_m + \frac{1}{G_f} v_f + \frac{1}{G_i} v_i \tag{9}$$

으로 표현된다. 이것을 역혼합법칙(inverse rule of mixture)이라 한다. 그러나 실제 복합재료는 보강되는 섬유의 배열과 형상분포에 따라 응력분포는 같지 않다. 즉, 식 (9)는 실험적 데이터와 많은 차이를 보이며, 복합재료 실제에 적용하는데 문제가 있다.<sup>(10)</sup> 이에 대해 Hopkins and Chamis<sup>(11)</sup>는 2상 복합재료에서 역혼합법칙 식을 수정하여 종방향 전단계수를 아래와 같이 예측했다.

$$G_c = G_m \left[ (1 - \sqrt{v_f}) + \frac{\sqrt{v_f}}{1 - \sqrt{v_f} (1 - G_m/G_f)} \right] \tag{10}$$

2상 복합재료의 종방향 전단계수, 식 (10)을 이용하여 3상 복합재료의 종방향 전단계수를 예측할

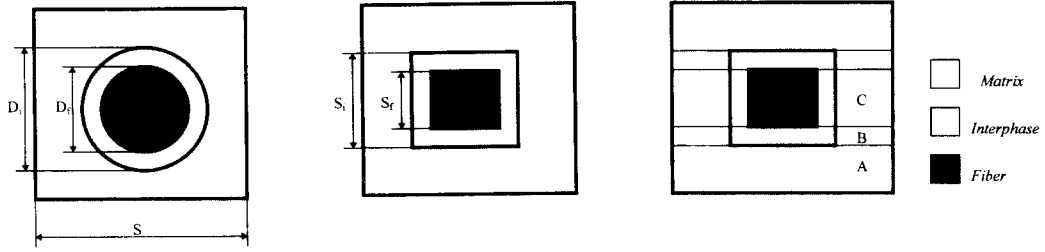


Fig. 2 Theoretical model for 3-phase composites

수 있다. Fig. 2는 사각배열에서 보강되는 섬유를 원형에서 사각형섬유로 수정한 단위격자 모델을 나타냈다. 모델을 3개의 부분 영역(subregion)으로 나누었다. A영역은 지지상만 존재하며, B영역은 기지와 계면 상으로 구성되며, C영역은 3개의 상 모두 구성되어 있다.

원형섬유와 사각형섬유의 형상관계에서, 원형섬유의 면적을 사각형섬유의 면적으로 변환하면

$$s_f = \sqrt{\frac{\pi}{4}} d_f, \quad s = \sqrt{\frac{\pi}{4} v_f} d_f \quad (11a)$$

또한 모델내의 계면상의 관계에서

$$s_i = \sqrt{\frac{\pi}{4}} d_i, \quad s = \sqrt{\frac{\pi}{4(v_f - v_i)}} d_i \quad (11b)$$

여기서,  $s$ 는 모델 한 변의 길이,  $s_i$ 는 계면상의 길이,  $s_f$ 는 섬유상의 길이이다.

$$s = s_m + s_i, \quad \text{즉} \quad 1 = \frac{s_m}{s} + \frac{s_i}{s} \quad (12)$$

으로 표현된다. 식 (11)과 식 (12)에서

$$\frac{s_f}{s} = \sqrt{v_f}, \quad \frac{s_i}{s} = \sqrt{v_f + v_i}, \quad \frac{s_m}{s} = 1 - \sqrt{v_f + v_i} \quad (13)$$

로 표현된다. 이것은 각 상의 길이비로 표현된다.

먼저 섬유와 계면상, 지지 모두가 포함된 부분 영역 C에서 종방향 전단계수는 역혼합법칙에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{1}{G_{r_c}} = \frac{1}{G_m} \frac{s_m}{s} + \frac{1}{G_f} \frac{s_f}{s} + \frac{1}{G_i} \left( \frac{s_i}{s} - \frac{s_f}{s} \right) \quad (14)$$

식 (13)을 식 (14)에 대입하면 아래와 같다.

$$G_{r_c} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{v_f} \left( \frac{G_m}{G_i} - \frac{G_m}{G_f} \right) - \sqrt{v_f + v_i} \left( 1 - \frac{G_m}{G_i} \right)} \quad (15)$$

이와 같은 방법으로 지지상과 계면상으로 구성된

부분 영역 B에서 종방향 전단계수를 구하면

$$\frac{1}{G_{c_b}} = \frac{1}{G_m} \frac{s_m}{s} + \frac{1}{G_f} \frac{s_f}{s} \quad (16a)$$

또한 식 (13)과의 관계에서

$$G_{c_b} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{v_f} - v_i \left( 1 - \frac{G_m}{G_f} \right)} \quad (16b)$$

이와 같은 결과에서 부분영역 A, B, C를 혼합법칙을 이용하여 병렬결합시키면

$$G_c = G_{c_a} \frac{s_m}{s} + G_{c_b} \left( \frac{s_f}{s} - \frac{s_i}{s} \right) + G_{c_c} \frac{s_i}{s} \quad (17a)$$

$$G_c = G_m \left[ (1 - \sqrt{v_f + v_i}) + \left( \frac{\sqrt{v_f + v_i} - \sqrt{v_i}}{1 - \sqrt{v_f} + v_i \left( 1 - \frac{G_m}{G_i} \right)} \right) + \frac{\sqrt{v_f}}{1 - \sqrt{v_f} \left( \frac{G_m}{G_i} - \frac{G_m}{G_f} \right) - \sqrt{v_f} + v_i \left( 1 - \frac{G_m}{G_i} \right)} \right] \quad (17b)$$

계면상이 포함된 3상 복합재료의 종방향 전단계수는 식 (17)로 예상할 수 있다. 여기서,  $G_i = G_m$ 이면 Hopkins and Chamis<sup>(10)</sup>에 의해 예상된 2상 복합재료의 종방향 전단계수, 식 (10)과 일치됨을 알 수 있다.

### 3. 수치해석 모델

3상 복합재료의 종방향 전단계수를 해석하기 위해 RVE(Representative Volume Element) 개념을 도입하여 보강되는 섬유에 대해 2차원의 단위격자(unit cell) 모델을 이용했다. 주어진 섬유체적비( $v_f$ )에 대해 계면상의 체적비( $v_i$ )를 변화시키기 위하여 모델링과 메싱을 코드화하였다. Fig. 3은 수치해석에 사용된 모델이다. Cell-1은 수직인 방향으로 인접한 섬유와 상호작용을 고려한 사각배열이

며, Cell-2는 인접한 섬유와 상호작용을 고려한 육각배열의 형태이다. 보강되는 섬유는 원형, 사각형, 육각형으로 한다.

Fig. 3에서 보강된 섬유의 체적비는  $v_f$ 이고, 계면 상의 체적비는  $v_i$ 이면 각각의 단위격자 모델에서 보강되는 섬유의 체적비가 같고 계면상의 체적비가 같으면

$$\begin{aligned} \text{원형섬유 단면의 직경, } d_f &= \sqrt{\frac{4v_f}{\pi}} \\ \text{육각형섬유 한 변의 길이, } h_f &= \sqrt{\frac{\pi}{12\sin 60^\circ}} d_f \\ \text{사각형섬유 한 변의 길이, } l_f &= \sqrt{\frac{\pi}{4}} d_f \end{aligned} \quad (18)$$

즉, 단위격자내에서 수직인 방향으로 인접한 섬유와 섬유 사이의 길이는 원형 단면이 가장 짧고 사각형 단면이 가장 길다. 이것은 섬유사이의 상호작용을 고려할 경우 섬유방향 전단계수는 원형 단면 섬유가 보강된 경우 가장 클 것으로 예상된다. 또한 같은 의미에서 계면상의 길이는

원형섬유의 계면상 직경

$$d_i = \sqrt{\frac{4}{\pi}} (v_f + v_i)$$

육각형섬유의 계면상 한 변의 길이

$$h_i = \sqrt{\frac{1}{3\sin 60^\circ}} (v_f + v_i)$$

사각형섬유의 계면상 한 변의 길이

$$l_i = \sqrt{v_f + v_i} \text{이다.} \quad (19)$$

여기서, 식 (18), 식 (19)에서 보강되는 섬유상/계면상의 체적비에 의해 모델을 방정식화 할 수 있다. 동일한 계면상 체적비에서 각각의 단면에서 계면상의 두께는 달라짐을 알 수 있다. 이와 같이 동일한 섬유체적비, 계면상 체적비에서 섬유와 계면상의 형상에 따른 종방향 전단계수의 예측이 가능하다. 유한요소해석 모델의 형상함수는 섬유의 체적비, 계면상의 체적비의 함수로 표현이 가능하다. 본 모델은 섬유의 형상함수는 섬유의 체적비, 계면상의 체적비 함수로 표현이 가능하다. 본 모델은 섬유의 체적비가 10%, 30%이며, 계면상의 체적비 ( $v_i$ )는  $v_f/10$ ,  $v_f/5$ ,  $v_f/2$ 로 변화시키며 해석한다.

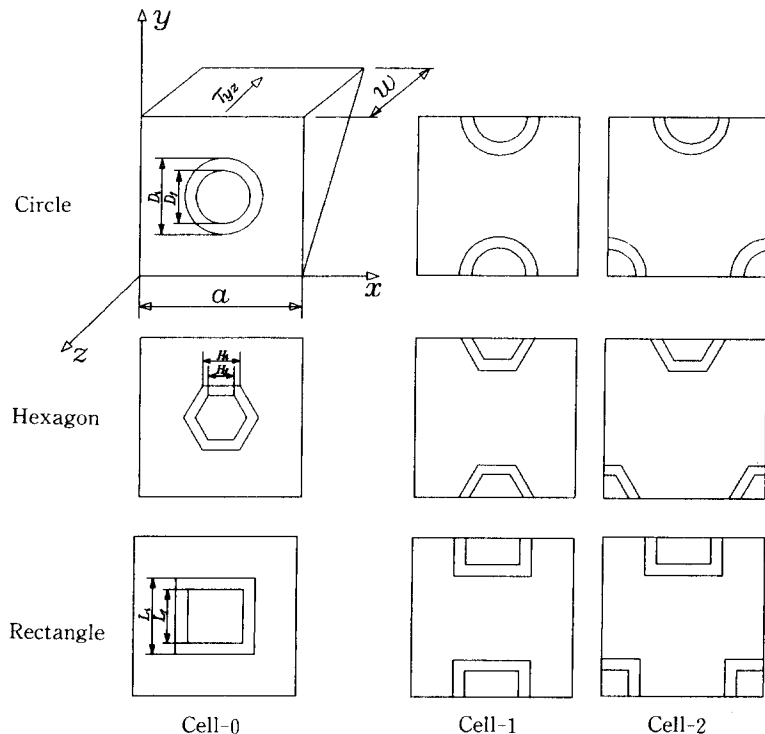


Fig. 3 Schematics of different types of fiber array and shape for numerical analysis of 3-phase composites

모든 상은 등방성이며, 계면은 완전한 결합으로 하며, 선형 탄성거동을 하며, 요소형태(element type)는 쉘요소를 사용한다. 또한 기지의 탄성계수는 3.0 GPa이며, 섬유와 계면의 탄성계수는 탄성계수 비(elastic modulus ratio :  $E_f/E_m=ER_f$ ,  $E_i/E_m=ER_i$ )에 따라 결정된다. 수치해석에 사용된 탄성계수비는  $ER_f : ER_i : E_m=100 : 50 : 1$ ,  $100 : 20 : 1$ ,  $100 : 10 : 1$  등 3가지 형태로 해석했다. 기지와 계면상의 푸아송비는 0.3, 섬유는 0.25로 한다.

3상의 단위격자 모델 해석에  $x$ ,  $y$ 축은 횡방향을 나타내며,  $z$ 축은 섬유방향, 즉 종방향으로 정의한다. 축의 변형량 요소는 각각  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 로 정의한다. Fig. 3에서  $y=a$ 에 따라 변형량  $w$ 를 가할 때 경계조건은  $w(x, 0)=0$ ,  $w(x, a)=w^*$ 이며 각 상의 계면은 연속적이다. 하중조건은 변위구속법을 이용하며, 변위구속은 하중구속방법보다 각 절점에 정확하게 해석이 가능하다.

가해진 전단변형률( $\gamma_c$ )은 0 rad.에서 0.01 rad.까지 4번의 부단계(substep)로 증가시킨다. 유한요소해석은 ANSYS 5.0<sup>(15)</sup>을 이용하며, 기하학적으로 변형이 되는 동안, 각 상의 체적은 일정하다고 했다.

또한 2상/3상 복합재료에서 소성영역의 응력과 변형률곡선을 얻기위해 복합재료의 전단변형률( $\gamma_c$ )은 0 rad.~0.03 rad.까지 10번의 단계로 증가시킨다. 각 단계는 5번의 부단계로 하며 허용반복 수렴 오차는  $1 \times 10^{-6}$ 으로 하며, 해석하는 동안 모델 형상의 체적은 일정하다고 하였다. 또한 비선형 해석은 Newton-Raphson방법<sup>(15)</sup>을 이용했다. 정확한 3상 복합재료의 응력과 변형률 선도 및 계면 상의 체적비변화에 따른 종방향 전단계수는 아래와 같이 예측할 수 있다.

$$[\bar{\tau}]_{yz} = \frac{\int_n [\tau_{yz}]_n dv_n}{\int_n dv_n}$$

$$[G]_{yz} = \frac{\bar{\tau}_{yz}}{\epsilon_c} \quad (20)$$

여기서,  $[\bar{\tau}]_{yz}$ 는 단위격자 모델의 평균 전단응력을 나타내며,  $[\tau_{yz}]_n$ 는  $n$ 번째 요소의 전단응력,  $dv_n$ 은  $n$ 번째 요소의 체적을 나타낸다. 그리고  $[G]_{yz}$ 는 3상 복합재료의 평균 종방향 전단계수이다. 각 상의 계면 응력집중과 응력분포를 고려하여 평균 전단응력은  $y=a$ 에서 절점의 평균 전단응력이 아닌 모델 전체요소의 전단응력을 이용한다. 원형 단면의 사

각배열에서 종방향 전단계수를 예측한 Adams and Doner 모델<sup>(2)</sup>의 전단응력은 원형, 육각형, 사각형 섬유의 형상에 따라  $y=a$ 의 요소형상이 달라지기 때문에  $y=a$ 에서의 평균 종방향 응력은 섬유형상에 따라 차이가 있다. 본 해석에서는 전체요소 내에서 평균 전단응력을 이용한다. 이것이 섬유형상 차이에서 나타나는 오차를 줄일 수 있다.

### 5. 결과 및 토의

미시적 관점에서 3상 복합재료의 종방향 전단계수를 이론 및 수치해석방법으로 예측하여 2상 복합재료의 해석 및 탄소/에폭시 복합재료의 실험결과와 비교 분석하였다. Figs. 4, 5에 섬유의 체적비가 10%, 30%일 때 섬유단면이 원형, 육각형, 사각형에서 계면상의 체적비 변화에 따른 종방향 전단계수의 수치해석 결과를 나타냈다. 또한 각각의 종방향 전단계수는 응력과 변형률 곡선에서 얻을 수 있다. Fig. 4에서 보장되는 섬유의 체적비가 10%에서의 결과이다. 계면상의 체적비변화에 종방향 전단계수는 선형적인 관계를 보였으며, 섬유배열에서 인접한 섬유와 상호작용을 고려한 사각배열(cell-1)이 육각배열(cell2)보다 모든 단면에서 높게 나타났다. 결과적으로 계면상의 체적비가 증가할수록 원형 단면에서 그 차이가 적었으며 사각형 단면에서 종방향 전단계수의 차이가 점점 크게 나타났다. 또한 사각형 단면, 육각형 단면, 원형 단

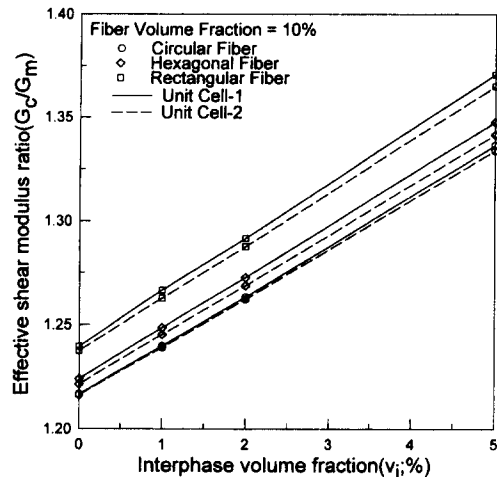


Fig. 4  $G_c-v_i$  relation for different fiber types in cases of unit cell-1 and unit cell-2. ( $v_f=10\%$ ,  $E_f/E_m=100$ ,  $E_i/E_m=20$ )

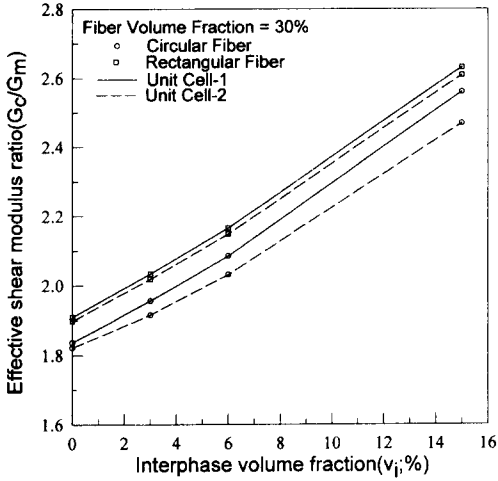


Fig. 5  $G_c$ - $v_i$  relation for different fiber types in cases of unit cell-1 and unit cell-2. ( $v_f = 30\%$ ,  $E_f/E_m = 100$ ,  $E_m = 20$ )

면 순으로 종방향 전단계수 차이를 보였다.

Fig. 5는 섬유체적비가 30%에서 계면상의 체적비 변화에 대해 종방향 전단계수를 나타냈다. 섬유체적비가 10%와 같이 사각배열이 육각배열 보다 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 2상 복합재료의 해석결과와 같다.<sup>(3)</sup> 계면상의 체적비 변화에 대해 사각배열과 육각배열의 종방향 전단계수의 차이는 사각형 단면에서는 일정한 값으로 그 차이를 보였으나 원형 단면에서는 계면상의 체적비가 증가할수록 그 차이가 점점 크게 나타났다. 즉, 사각배열에서 전단응력이 급격히 증가함을 보였다.

이것은 계면상의 보강효과는 육각배열보다 사각배열이 뛰어난을 알 수 있다. 또한 Cell 1에서 섬유체적비가 10%와 30%의 비교에서 사각형 단면과 원형 단면에서 종방향 전단계수 차이는 섬유체적비가 30%에서 그 차이의 비가 적었다. 이것은 식 (18), 식 (19)에서 단위격자 내에 수직의 방향으로 계면상과 계면상 사이의 거리는 원형 단면 섬유일 때 가장 짧고 사각형 단면일 때 가장 길다. 즉, 인접한 섬유와 상호작용은 원형 단면섬유가 가장 좋을 것으로 예상된다. 그러나 섬유체적비가 낮은 경우는 섬유의 상호작용보다는 섬유형상이 종방향 전단계수 결정에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 섬유체적비가 증가할수록 단위격자의 기지 길이가 짧아지므로 기지길이의 영향으로 Fig. 5에서 계면상의 체적비가 증가할수록 원형 단면에서 종방향 전단계

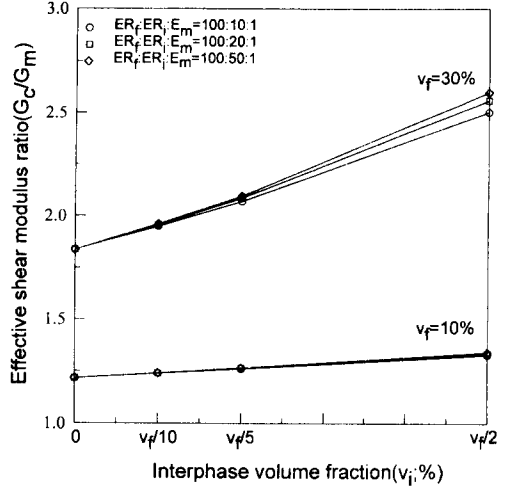


Fig. 6  $G_c$ - $v_i$  relation with circular fiber shape for unit cell-1

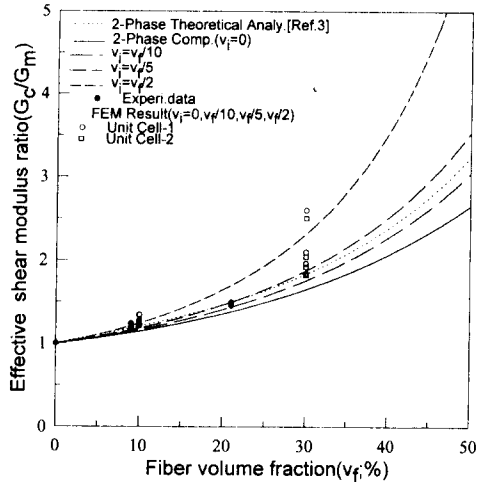


Fig. 7  $G_c$ - $v_i$  relation with circular fiber shape for 3-phase composite. ( $E_f/E_m = 100$ ,  $E_f/E_m = 50$ )

수의 증가율이 높게 나타나는 원인으로 예상된다. Figs. 4, 5의 결과에서 섬유체적비가 더욱 더 증가할수록 원형 단면의 섬유일 때 종방향 전단계수가 높을 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 6은 원형섬유에서 배열이 Cell-1일 때 섬유의 체적비가 10%, 30%에서 계면상의 물성을 변화 및 계면상의 체적비에 따른 종방향 전단계수를 나타냈다. 섬유체적비가 10%에서는 계면상의 물성증가에 따른 종방향 전단계수의 증가가 매우 적음을 보였다. 그러나 섬유체적비가 30%에서는 계면상의 물성이 전단계수 결정에 영향을 미침을 보였다. 이

것은 섬유체적비가 증가에 따라 계면상의 체적비가 증가되기 때문에 높은 섬유체적비에서는 계면상의 영향이 물성결정에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다.

Figs. 7, 8은  $ER_f : ER_i : ER_m = 100 : 50 : 1$ 에서 이론 및 탄소/에폭시의 실험결과를 섬유체적비 증가에 대해 나타냈다. 먼저 Fig. 7은 원형 단면섬유에서 섬유체적비 변화에 종방향 전단계수를 나타냈다. 원형섬유의 이론식(식 1)과 역혼합법칙에서 유도된 3상 복합재료의 종방향 전단계수 식 (17)를 계면상 체적비를 달리하며 나타냈다. 먼저 탄소/에폭시의 실험적 결과는 2상 복합재료의 이론적 결과와 일치하였으며 수치해석 결과도 식 (1)과 잘 일치하였다.<sup>(3)</sup> 그러나, 3상 복합재료의 모델에서는 수치해석 결과가 이론치보다 높게 나타났다. 이것은 단위격자 배열, 섬유의 형상 등의 영향 및 이론적 해석에서의 가정(식 9)과 수치해석의 모델내의 각 상의 응력전달 등의 영향으로 예상된다.

Fig. 8은 섬유단면이 사각형일 때 수치해석 결과와 이론치를 나타냈다. 수치해석 결과가 2상 및 3상 모델의 이론치 보다 모두 높게 나타났다. 이것은 수치해석 모델내의 지지부분의 종방향 전단응력 분포를 해석함으로써 그 이유를 알 수 있다.

Fig. 9는 단위격자 모델에서 수직할 방향으로  $y = s/2$ 인 곳에서 섬유체적비가 10%일 때 각각의 섬유단면에 대해 종방향 전단응력을 나타냈다. 수직할 방향으로 지지길이 가장 짧은 원형 단면인 경우 다른 단면에 비해 평균응력은 낮게 나타났으나

모델의 중심에서의 최대응력은 가장 높게 나타났다. 이것은 수직방향으로 인접한 섬유와 상호작용의 영향으로 예상된다. 수직방향으로 지지길이 가장 길고, 평균응력의 가장 높게 나타난 사각형 단면의 모델에서 최대응력은 원형 단면보다 낮게 나타났다. 이것은 섬유체적비가 낮은 경우 전체 모델의 길이에 비해 인접한 섬유와 섬유 사이의 길이가 길기 때문에 종방향 전단계수를 결정하는 것은 섬유형상의 차이에 의한 지지부분의 응력 전달에 의해 결정됨을 알 수 있다.

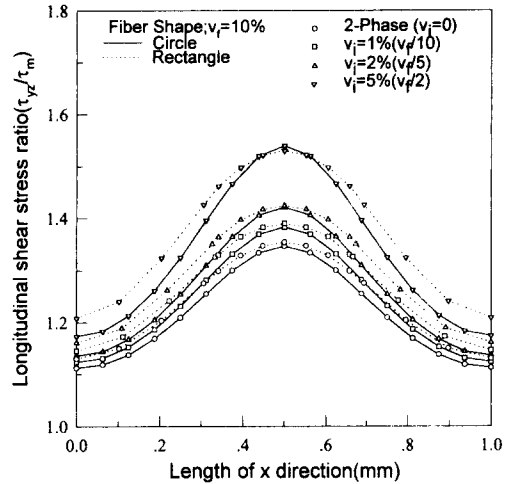


Fig. 9 Shear stress distribution of different fiber types at  $y=s/2$  for unit cell-1 as a function of  $v_i$  ( $v_i=10\%$ )

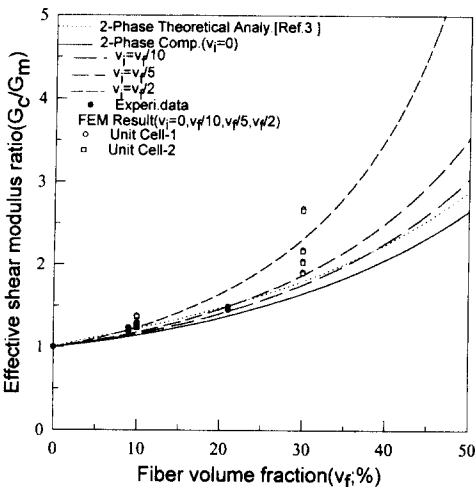


Fig. 8  $G_c, v_f$  relation with rectangular fiber shape for 3-phase composite. ( $E_f/E_m = 100, E_i/E_m = 50$ )

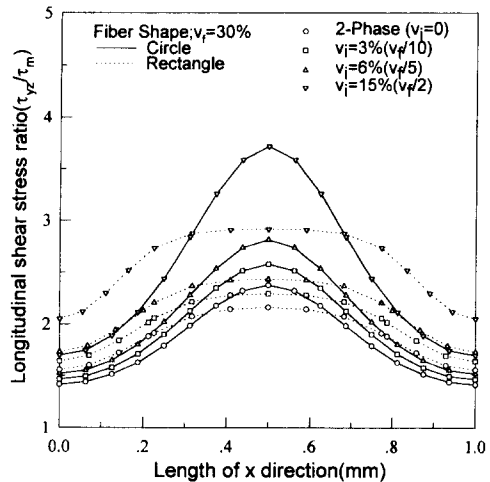


Fig. 10 Shear stress distribution of different fiber types at  $y=s/2$  for unit cell-1 as a function of  $v_i$  ( $v_i=30\%$ )



Fig. 10는 보강되는 섬유체적비가 30%일 때의 종방향 전단응력 분포를 나타낸 것이다. 원형 단면의 모델은 계면상의 체적비가 증가할수록 모델 중심의 최대응력은 급격히 증가함을 보였으나, 사각형섬유의 모델은 최저응력값은 원형 단면보다 높게 나타났으나 모델 중심에서의 최대응력은 원형 단면에서 비해 상당히 둔화된 것을 알 수 있다. 이와 같은 것은 보강되는 섬유 및 계면상의 체적비가 증가하면 모델내 수직인 방향으로 기지길이가 짧아지므로 인접한 섬유와 섬유의 상호작용의 영향으로 기지내의 응력분포 값이 높게 나타났다. 또한 보강되는 섬유의 최적비가 높을 경우(50%)에는 원형 섬유가 보강된 모델의 종방향 전단계수 값이 높을 것으로 예상된다. 이것은 식 (1), (2), (3)의 결과와 일치하였다.

또한 고분자기지 복합재료에 각각의 섬유형상에 대해 보강되는 섬유의 체적비가 10%에서 비선형, 즉 소성영역에서 응력과 변형률곡선을 예측하였다. 섬유의 단면에 관계없이 비슷한 응력과 변형률 곡선을 보였다. Figs. 11, 12는 섬유의 배열이 Cell-1과 Cell-2에서 2상 복합재료와 3상 복합재료의 모델에서 응력과 변형률 곡선을 나타냈다. 탄성 영역 내에서 섬유형상이 물성결정에 중요한 인자로 작용함을 알 수 있었으나 소성흐름에서 섬유 형상의 보강효과가 줄어들었다. 즉 접선계수(tangent

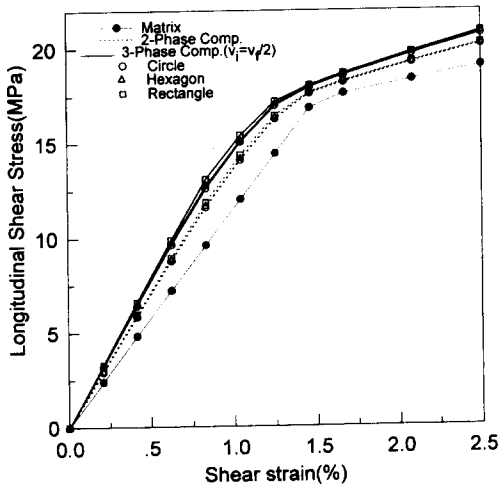


Fig. 11 Stress-strain curves of numerical result for different fiber types in cases of unit cell-1 of 2-phase and 3-phase composites. ( $E_t : E_f : E_m = 100 : 20 : 1$ )

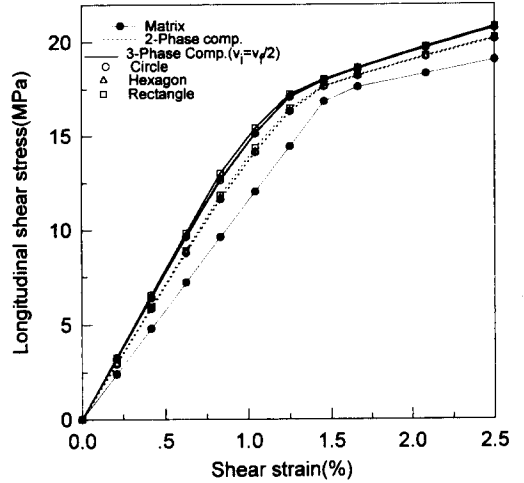


Fig. 12 Stress-strain curves of numerical result for different fiber types in cases of unit cell-2 of 2-phase and 3-phase composites. ( $E_t : E_f : E_m = 100 : 20 : 1$ )

modulus)가 거의 같음을 알 수 있다.

복합재료에서 섬유의 배열 및 형상이 소성흐름에 큰 영향을 미치는 금속기지 복합재료의 결과<sup>(9)</sup>와 달리 고분자기지 복합재료의 경우 섬유의 형상 및 배열이 인장강도 및 접선계수에 적은 영향을 미치며, 소성흐름은 보강되는 섬유보다는 기지의 거동에 큰 영향을 받는다. 이것은 소성영역에서 섬유의 상호작용에 의한 응력전달이 급격히 둔화되는 것으로 예상된다. 또한 낮은 섬유체적비( $v_f=10%$ )에서는 사각형, 육각형, 원형 단면 순으로 접선계수 크기의 변화를 보였으나 보강되는 섬유의 체적비( $v_f=30%$ )가 증가할수록 원형 단면섬유가 종방향 전단계수가 높게 나타났으며, 소성영역에서는 원형 단면의 접선계수가 높게 나타났다. 또한 계면상의 형상, 물성변화 및 체적비 변화가 소성영역에 미치는 영향에 대한 연구가 지속되어야 한다.

## 6. 결 론

2상 복합재료의 이론 및 수치해석 결과를 바탕으로 섬유/기지의 계면에 계면상이 존재하는 고분자기지 3상 복합재료의 종방향 전단계수를 예측하였다. 수치해석의 결과에서 낮은 섬유의 체적비에서는 섬유단면이 사각형일 때 종방향 전단계수가 높게 나타났으나 섬유 및 계면 상의 체적비가 증가할수록 원형 단면의 모델에서 종방향 전단계수가 높

게 나타났다. 이것은 2상 복합재료의 결과의 결과와 비슷한 결과를 보였으나 섬유의 체적비가 증가할수록 그 차이가 크게 나타났다. 또한 사각배열에서 계면상에 대한 보강효과 및 배열효과가 뛰어난 것을 보였다. 이것은 보강되는 섬유 및 계면상의 형상 차이에 의해 수직인 방향으로 섬유의 상호작용의 영향이다. 3상 복합재료의 모델에서 수치해석의 결과가 이론치보다 높게 나타났다. 이것은 모델내의 모든 상의 응력이 같다는 이론해석 가정의 오차로 추정된다. 또한 소성영역 해석에서 2상 복합재료 및 3상 복합재료의 모델에서 금속기지 복합재료의 결과와 달리 고분자기지 복합재료에서 섬유의 형상 및 배열이 소성흐름, 즉 접선계수 결정에 적은 영향을 미침을 보였다. 즉 소성흐름은 기지의 소성거동에 영향을 받으며, 섬유와 섬유의 상호작용이 탄성영역에 비해 급격히 둔화되는 것으로 예상된다.

### 참고문헌

- (1) Hashin, Z. and Rosen, B. W., 1964, "The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 31E, pp. 223.
- (2) Admas, D. F. and Doner, D. R., 1967, "Longitudinal Shear Loading of Unidirectional Composites," *J. of Comp. Mat.*, Vol. pp. 4~17.
- (3) Lee, D. J., Jeong, T. and Kim, H., 1995, "Effective Longitudinal Shear Modulus of Unidirectional Composites," *Proc. in 10th Int. Conf. on Comp. Mat.*, Vol. 4, Whistler, Canada, pp. 171~179.
- (4) Wang, D. Z. and Liu, Z. R., 1995, "Interface Structures in an  $\beta$ -SiC Whisker-Al Composite," *Proc. of ICCM-10*, Vol. 4, pp. 455.
- (5) Subramanian, S. Feifsnider, K. L., 1995, "Effective of Fiver-Matrix Interphase on the Time Dependent Response of Graphite/Epoxy Composite," *Proc. of ICCM-10*, Vol. 4, p. 493.
- (6) Tsujioka, N. and Kotaki, M., 1995, "Systematic Studies on the Relation Between Interfacial Properties and Fracture Properties on CFRP," *Proc. of ICCM-10*, Vol. 4, p. 501.
- (7) Lankford, J. and Nicholls, A., 1995, "The Role of the Interphase in Compressive Damage Development in Polymeric Composite," *Proc. of ICCM-10*, Vol. 4, p. 509.
- (8) Tien-Wei, S. and Rong, K., 1995, "Interaction between Carbon Fibre and Thermoplastics," *Proc. of ICCM-10*, Vol. 4, p. 487.
- (9) Wilson, D. W., 1990, "Evaluation of the V-Notched Beam Shear Test Through an Interlaboratory Study," *J. of Composites Technology and Research*, Vol. 12, pp. 131~138.
- (10) Gibson, R. F., 1994, *Principles of Composite Materials Mechanics*, Mc Graw Hill.
- (11) Hopkins D. A. and Chami, C. C., 1988, "A Unique Set of Micromechanics Equations for High Temperature Metal Matrix Composites," *ASTMSTP 964*, pp. 159~176.
- (12) Shen, Y. L., Finot, M., Needleman, A. and Suresh, S., 1994, "Effective Elastic Response of Two-Phase Composites," *Acta Metall.*, Vol. 42, pp. 77~79.
- (13) Stuart, M., 1990, "Int. Encyclopedia of Composites," *VCH*, Vol. 12, pp. 419~421.
- (14) Brockenbrough, J. R. and Suresh, S., 1991, "Deformation of Metal Matrix Composites with Continuos Fibers," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 39, No. 5, pp. 735~752.
- (15) Peter Kohnke, 1994, *ANSYS User's Manual for Revision 5.0*, Swanson Analysis System, Inc.