

< 논문 >

불규칙 섬유배열을 가진 일방향 복합재료의 경계면 변형률 분포 해석

하성규* · 진교국** · 오제훈†

(2005년 6월 1일 접수, 2006년 1월 20일 심사완료)

Interfacial Strain Distribution of a Unidirectional Composite with Randomly Distributed Fibers

Sung Kyu Ha, Kyo Kook Jin and Je Hoon Oh

Key Words : Interfacial Strains(경계면 변형률), Micromechanics(미시역학), Representative Volume Element(RVE, 대표체적요소), Regular Fiber Array(규칙배열), Random Fiber Array(랜덤배열)

Abstract

The micromechanical approach was used to investigate the interfacial strain distributions of a unidirectional composite under transverse loading in which fibers were usually found to be randomly packed. Representative volume elements (RVE) for the analysis were composed of both regular fiber arrays such as a square array and a hexagonal array, and a random fiber array. The finite element analysis was performed to analyze the normal, tangential and shear strains at the interface. Due to the periodic characteristics of the strain distributions at the interface, the Fourier series approximation with proper coefficients was utilized to evaluate the strain distributions at the interface for the regular and random fiber arrays with respect to fiber volume fractions. From the analysis, it was found that the random arrangement of fibers had a significant influence on the strain distribution at the interface, and the strain distribution in the regular fiber arrays was one of special cases of that in the random fiber array.

1. 서론

복합재료의 거동을 파악하기 위하여 주로 사용되는 거시적인 접근 방법은 복합재료를 구성하고 있는 재료물성의 변화를 평균화하여 나타내기 때문에 다양한 복합재료에 큰 무리없이 적용 가능하다는 장점을 가지고 있는 반면, 재료 내부의 국부적인 변화를 파악하기에는 한계가 있다는 단점을 가지고 있다. 미시적인 접근 방법을 사용하면, 섬유와 기지의 파손이나 두 재료의 경계면에서의 거동, 또는 다양한 섬유/기지재료가 거동에 미치는

영향 등 보다 더 자세한 정보를 얻을 수 있다. 복합재료의 심각한 손상은 대부분 섬유와 기지의 경계면에서 발생되기 때문에, 세부적인 정보를 얻을 수 있는 미시적인 접근 방법이 파손 해석에 더 적합하다고 할 수 있다.

복합재료 미시역학의 주된 관심사는 적합한 미시구조적 모델을 수립하는 것과 복합재료 구성요소의 다양한 물성과 분포로부터 등가 유효 물성치(effective material property)와 파손 강도(failure strength)를 예측하는 것이다. 지금까지 많은 연구자들이 미시역학적 방법을 사용하여 다양한 복합재료 구성요소의 물성과 섬유체적비를 통해 등가 유효 물성치와 파손 강도를 제시하는 연구를 수행해왔다.⁽¹⁻⁸⁾ 최근, 사각배열(square array) 또는 육각배열(hexagonal array)과 같은 규칙배열을 복합재료의 단위 셀로 가정한 유한요소해석을 통해 등가 유효 물성치와 파손 거동을 예측하려는 연구가 진

* 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

** 회원, 한양대학교 대학원 기계설계학과

† 책임자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

E-mail: jehoon@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5252 FAX : (031)406-5550

행되어 왔지만,⁽⁹⁻¹²⁾ 실제로 강화섬유의 공간적인 분포는 규칙적이지 않고 복합재료를 제조하는 방법에 따라 매우 불규칙적인 배열을 가지고 있기 때문에, 규칙적인 배열을 이용한 해석은 실제적인 복합재료의 거동을 표현하는데 제한적이다.⁽²⁰⁾

횡 방향 하중을 받는 복합재료는 일반적으로 작은 하중이 작용하여도 섬유/기지의 경계면이 박리되는 파손이 발생하기 때문에, 미시역학적인 방법을 통하여 복합재료의 섬유/기지의 경계면에서의 거동을 이해하는 것은 복합재료의 특성과 신뢰성을 향상시키는데 매우 중요하다. 기지는 등방성이기 때문에 응력 불변량에 기초한 파손 이론을 일반적으로 사용해 왔지만, 최근에는 변형률에 근거한 변형률 불변량 파손이론(Strain Invariant Failure Theory, SIFT)이 새롭게 제안되었으며, 변형률 불변량 파손이론과 미시역학적인 방법을 함께 사용함으로써 해석의 정확성을 향상시킬 수 있다.⁽¹³⁻¹⁷⁾ 따라서, 복합재료의 파손을 설명하기 위해 미시역학적 해석을 통한 복합재료의 섬유/기지의 경계면 변형률 분포를 조사하는 것은 복합재료의 해석에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 미시역학적인 방법을 사용하여 섬유/기지의 공간적인 분포가 횡 방향 하중을 받는 복합재료의 섬유/기지의 경계면 변형률 분포에 미치는 영향을 조사하였다. 대표체적요소(Representative Volume Element, RVE)는 사각배열(square fiber array)과 육각배열(hexagonal fiber array), 그리고 랜덤배열(random fiber array)을 사용하여 생성하였고, 랜덤배열을 위한 RVE는 실제 복합재료의 횡 단면 이미지와의 비교를 통해 검증하였다. 유한요소해석을 통하여 섬유/기지 경계면에서의 법선(normal), 접선(tangential) 및 전단(shear) 변형률을 평가하였고, 변형률의 분포는 주기적인 경향을 보이기 때문에 푸리에 급수(Fourier series approximation)를 이용하여 표현하였다.

2. RVE의 생성

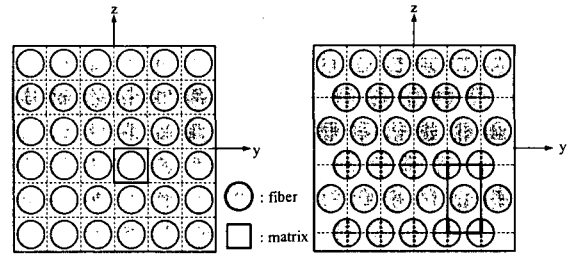
Fig. 1은 복합재료의 섬유 분포가 사각배열, 육각배열 또는 랜덤배열이라고 가정할 경우에 대한 단위 셀을 나타내고 있다. 각 배열의 단위 셀은 반복경계조건을 적용하면 전체적인 복합재료의 거동을 표현할 수 있고, 각각의 단위 셀을 RVE로 표현하여 해석하였다. 랜덤배열을 위한 RVE는 실제 복합재료의 섬유 반경과 섬유체적비에 따른 섬유 수를 고려하여 생성하였다.

다음은 랜덤배열을 위한 RVE를 생성하는 과정이다.

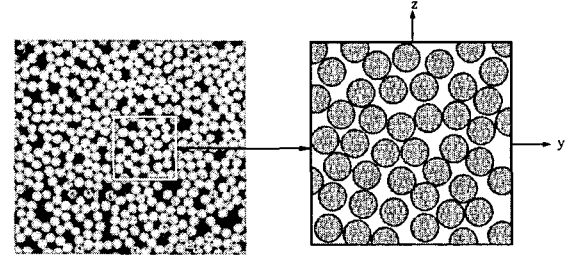
STEP 1. 섬유체적비(v_f)를 구하기 위해 섬유의

반경(r_f)과 섬유의 수(n_f)를 정한다.

STEP 2. 단위 면적 내에서 임의의 한 점을 선



(a) Square and hexagonal fiber arrays



(b) Random fiber array

Fig. 1 Unit cells of regular and random fiber arrays

택한다.

STEP 3. STEP 2에서 선택한 점을 중심으로 하고 반경(r_f)을 가진 섬유를 그린다.

STEP 4. 같은 중심을 가지고 $2r_f$ 의 반경을 가지는 원형내의 지역을 선택한다.

STEP 5. 첫번째 섬유안에 두번째 섬유가 놓이지 않게 하기 위해서 STEP 4에서 선택한 원형내의 지역을 제외한 영역에서 임의의 점을 선택한다.

STEP 6. 원하는 섬유 체적비에 도달할 때까지 STEP3.에서 STEP5까지 반복한다.

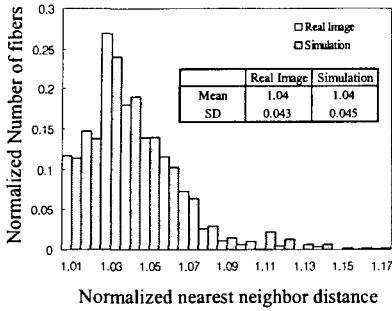
랜덤배열을 위한 RVE와 실제 복합재료의 섬유배열이 동등한지 검증하기 위해 섬유 공간적 분포를 정량화하여 나타내주는 최 근접 이웃거리 분포함수(nearest neighbor distribution function)와 반경 분포함수(radial distribution function)를 이용하였다.^(18,19)

반경 분포 함수는 식 (1)와 같이 정의된다.

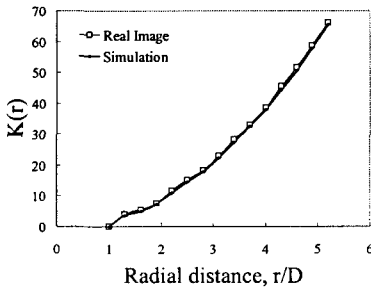
$$g(r) = \frac{A}{2\pi r N} \frac{dK(r)}{dr} \quad (1)$$

여기서, A는 정보를 보기 위한 영역(viewing area)이고, N은 A을 만들 수 있는 섬유의 개수이다. K(r)은 2차 강도 함수(second order intensity function)이고 식 (2)과 같이 정의된다.

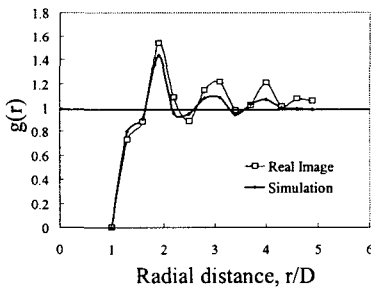
$$K(r) = \frac{1}{N(r)} \sum_{k=1}^{N(r)} I_k(r) \quad (2)$$



(a) Nearest neighbor distribution



(b) 2nd-order intensity function (K(r))

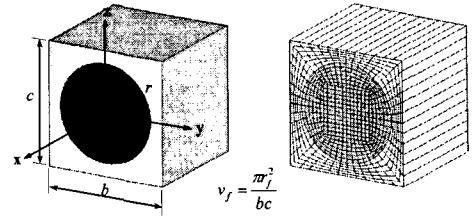


(c) Radial distribution function (g(r))

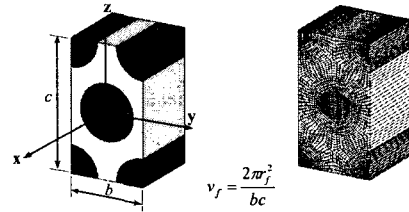
Fig. 2 Spatial correlation functions obtained from real images of transverse cross-section and simulated RVE

여기서, $I_k(r)$ 은 k 번째 점에서 반경 r 내에 있는 섬유 중심의 개수이고, $N(r)$ 은 정보를 보기 위한 영역을 만들 수 있는 섬유의 총 개수이다.

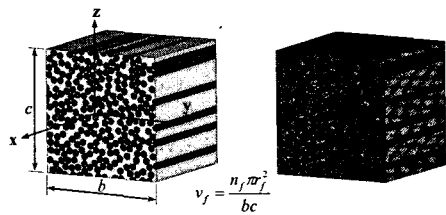
네 개의 실제 복합재료 이미지를 측정해 본 결과, 섬유체적비는 0.608 ± 0.018 이고 섬유 직경은 $6.75 \pm 0.33 \mu\text{m}$ 이었으며 섬유 직경의 편차는 비교적 작기 때문에 본 연구에서는 무시한다고 가정하였다. Fig. 2 는 섬유체적비가 0.6 일 때 랜덤배열을 위한 RVE 와 실제 복합재료 이미지를 최 근접 이웃거리 분포함수와 반경 분포함수를 통하여 비교한 그래프이고, 세 그래프에서 보듯이 랜덤배열을 위한 RVE 는 실제 복합재료를 매우 근사하게



(a) Square array



(b) Hexagonal array



(c) Random array

Fig. 3 Finite element models for regular and random fiber arrays

표현하고 있다.

3. 수치적인 해석

3.1 각 RVE 의 유한요소모델

Fig. 3 은 사각배열, 육각배열 그리고 랜덤배열의 유한요소모델을 보여준다. 각 RVE 의 중심에 직교 좌표계를 사용하였고, x 축은 섬유 방향이고 y, z 축은 섬유의 단면 방향이다. 3 차원 유한요소모델은 8 개의 절점을 갖는 육면체 요소를 사용하였고, 유한요소해석을 위하여 상용 프로그램인 ANSYS 를 사용하였다. 섬유 체적비가 0.6 일 때 랜덤배열을 위한 RVE 에 사용된 요소의 수는 약 29,400 개이고, 섬유의 개수는 약 240 개이다.

본 연구에서 사용한 복합재료는 상업적으로 생산되고 있는 탄소섬유 복합재료이고, 탄소섬유는 횡등방성, 기지는 등방성으로 가정하였으며 그 물 성치는 Table 1 과 같다. 각 단위 셀은 전체적인 복합재료의 거동을 표현해야 하기 때문에, 다음과 같은 반복경계조건을 적용하였다.

- (1) 세 개의 직교면 ($x=0, y=-b/2, z=-c/2$) 은 풀러지지이다.

Table 1 Material properties of the carbon fiber composite

Properties	Carbon Fiber	Epoxy
E_x (GPa)	303	3.31
$E_y=E_z$ (GPa)	15.2	3.31
G_{xy} (GPa)	9.65	1.23
ν_{xy}	0.2	0.35
ν_{yz}	0.2	0.35

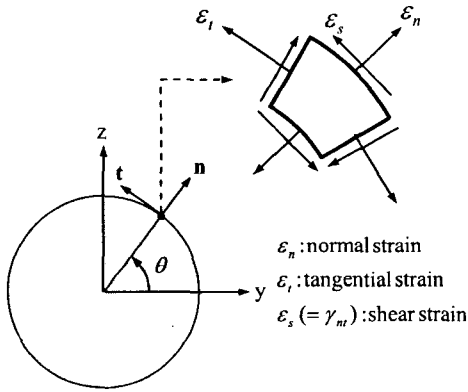


Fig. 4 Strain components at fiber/matrix interface

- (2) 다른 두면 ($x = -a, z = c/2$)은 변형 후에도 평면을 유지하는 구속조건이다.
- (3) 남은 자유면 ($y = b/2$)에 일정한 변위를 준다.

3.2 경계면 변형률의 푸리에 급수

유한요소해석을 통하여 도출된 섬유/기지 경계면 변형률은 법선, 접선 및 전단 변형률로 표현되고, Fig. 4는 경계면 변형률을 도식화한 것이다. 섬유/기지의 경계면은 y 축과 z 축으로 대칭이기 때문에 경계면 변형률은 주기적인 특성을 지니고 있고, 이는 푸리에 급수를 이용하면 식 (3)에서 보듯이 손쉽게 표현할 수 있다.

$$\epsilon_i(\theta) = a_0^i + \sum_{k=1}^{N_i} (a_k^i \cos k\theta + b_k^i \sin k\theta) \quad (3)$$

$i = n, t, s$

여기서, N_i 는 푸리에 급수의 차수이며, θ 은 y 축에서부터 시계 반대방향의 각도이다. 이 때, 푸리에 급수의 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a_0^i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_i(\theta_j)$$

$$a_k^i = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_i(\theta_j) \cos k\theta_j, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N_i \quad (4)$$

$$b_k^i = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_i(\theta_j) \sin k\theta_j$$

규칙배열을 위한 RVE는 한 각도에 하나의 경계면 변형률을 갖지만, 랜덤배열을 위한 RVE는 한 각도에 여러 개의 경계면 변형률을 가지기 때문에 통계적인 방법을 사용하였다. 랜덤배열의 경계면 변형률 분포가 정규분포를 이룬다고 가정하면, 통계 변수인 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)로 표현할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\mu_\epsilon(\theta) = \mu_{a_0} + \sum_{k=1}^{k=N_i} (\mu_{a_k} \cos k\theta + \mu_{b_k} \sin k\theta) \quad (5)$$

$$\sigma_\epsilon(\theta) = \sqrt{\sigma_{a_0}^2 + \sum_{k=1}^{k=N_i} [(\sigma_{a_k} \cos k\theta)^2 + (\sigma_{b_k} \sin k\theta)^2]} \quad (6)$$

4. 결과

4.1 규칙배열의 경계면 변형률 분포

Fig. 5는 규칙배열에서 섬유체적비가 0.1에서 0.6으로 변화할 때, 섬유/기지의 경계면 변형률 분포를 경계면의 각도에 따라 표현한 그래프이다. 사각배열과 육각배열 모두 섬유체적비가 증가함에 따라 변형률도 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a)에서 보듯이, 법선 변형률은 하중 방향과 같은 $\theta = 0^\circ$ 에서 최대값을, 하중방향과 수직인 $\theta = 90^\circ$ 에서 최소값을 가진다. 사각배열에서 섬유체적비가 커짐에 따라 법선 변형률이 $\theta = 90^\circ$ 근처에서 감소하는데 이는 섬유체적비가 증가함에 따라 섬유간의 거리가 가까워지므로 섬유가 기지의 법선 변형률 발생을 제한하기 때문이다. 육각배열은 섬유체적비가 커짐에 따라 모든 각도에서 법선 변형률이 증가하지만, $\theta = 60^\circ$ 근처에서는 변화가 거의 없다. 이는 주위의 섬유 배열($\theta = 60^\circ$)에 의해 $\theta = 60^\circ$ 근처에서는 기지가 법선 방향으로의 변형이 자유롭지 못하기 때문이다.

Fig. 5(b)에서 보듯이, 접선 변형률은 섬유체적비가 증가함에 따라 증가하지만, 그 크기는 법선 변형률보다 작은 값을 가지고 있다. 이는 횡 방향

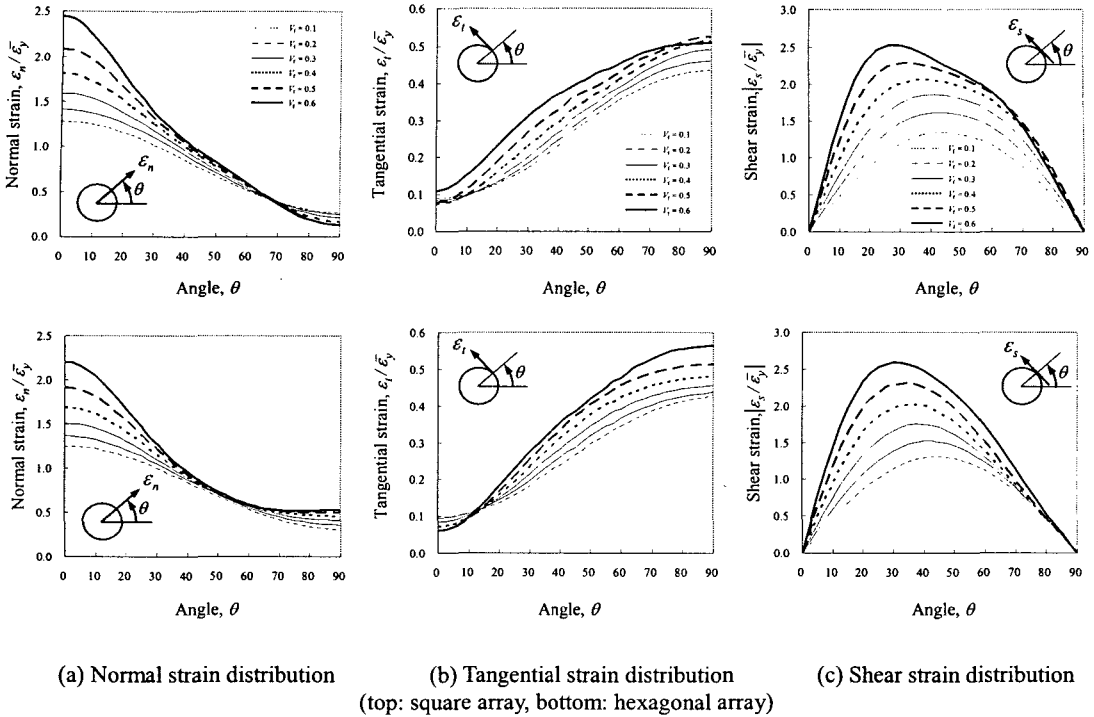


Fig. 5 Normalized strain distributions at the interface for the regular fiber arrays

하중이 접선 변형률에게는 많은 영향을 미치지 못하는 것을 의미한다. 접선 변형률은 사각배열과 육각배열 모두 $\theta = 0^\circ$ 에서 최소값을 $\theta = 90^\circ$ 에서 최대값을 갖는다.

Fig. 5(c)에서 보듯이, 전단 변형률의 최대값은 사각배열과 육각배열 모두 법선 변형률의 최대값과 대등한 값이다. 전단 변형률의 최대값이 나타나는 위치는 낮은 섬유체적비에서는 약 $\theta = 45^\circ$ 근처에서 나타나지만, 높은 섬유체적비에서는 약 $\theta = 30^\circ$ 근처에서 나타난다. 전체적으로 낮은 섬유체적비에서는 사각배열과 육각배열 모두 비슷한 전단 변형률 분포를 보여주고 있지만, 섬유체적비가 증가함에 따라 서로 다른 분포를 보여준다. 이는 하중의 방향과 주위 섬유들과의 상대적 위치로 연관 지어 설명할 수 있다. 횡 방향 하중 하에서, 사각배열에서는 0° 와 90° 에 놓인 두 개의 주위의 섬유가, 육각 배열에서는 60° 에 놓인 하나의 주위의 섬유가 전단 변형률에 영향을 미친다고 할 수 있다. 비록 Fig. 5 는 규칙배열의 결과이지만, 복합재료를 미시구조적으로 볼 때 섬유의 공간적인 분포가 섬유/기지의 경계면 변형률 분포에 많은 영향을 미치고 있음을 명확히 보여주고 있다.

Fig. 6 은 사각배열과 육각배열에서 섬유체적비가 0.6 일 때, 유한요소해석으로부터 도출된 법선 변형률을 다양한 차수의 푸리에 급수로 근사한 그

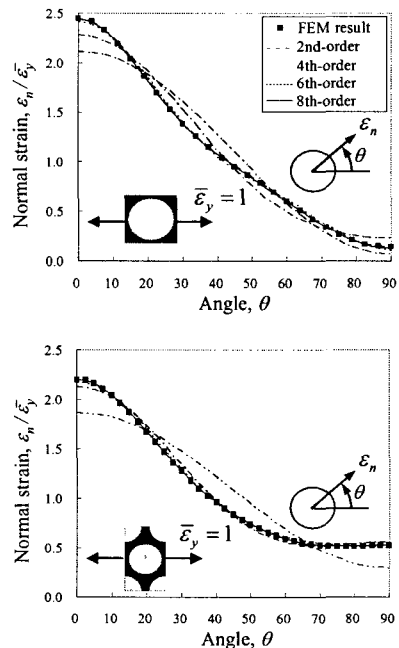


Fig. 6 Interfacial normal strains obtained by direct FE calculation and Fourier series approximation (top: square array, bottom: hexagonal array)

래프이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 8차 이상의 푸리에 급수로 근사했을 때 법선 변형률과 잘 일치한다. 접선과 전단 변형률도 같은 경향을 보이며, 푸리에 급수의 계수만 알고 있다면 섬유/기지의 경계면 변형률을 정확하고 빠르게 구할 수 있다.

4.2 랜덤배열에서 경계면 변형률 분포

Fig. 7은 랜덤배열에서 서로 다른 세 개의 섬유 체적비($v_f=0.2, v_f=0.4, v_f=0.6$)에 대해, RVE 내의 여러 개의 섬유/기지 경계면 중 임의의 다섯 개의 경계면에서 법선, 접선 및 전단 변형률을 보여주고 있다. 낮은 섬유체적비에서는 랜덤배열의 변형률 분포가 규칙배열의 변형률 분포와 유사하지만, 높은 섬유체적비로 갈수록 변형률 분포의 변화가 심하다. 비록 같은 섬유체적비일지라도, 랜덤배열에서 경계면 변형률의 최대값과 그 위치는 각 각의 섬유/기지의 경계면마다 모두 다르다. 규칙배열에서 섬유/기지의 경계면 변형률은 각도에 따라 하나의 값으로 결정되지만, 랜덤배열에서는 각 각의 경계면 변형률이 서로 다르므로 통계적 방법을 사용해야 한다.

본 연구에서는 랜덤배열에서 섬유/기지의 경계면 변형률을 정규 분포라고 가정하고, 푸리에 급수의 계수도 또한 식 (5),(6)에서처럼 평균과 표준편차로 표현되는 정규 분포라 가정한다.

Fig. 8은 규칙배열과 랜덤배열에서 섬유체적비에 따른 경계면 변형률의 푸리에 급수의 계수를 나타내며, 랜덤배열의 푸리에 계수는 그 평균으로 나타내었다. Fig. 8 (a), (b)을 보면, 법선과 접선 변형률의 푸리에 급수의 사인함수의 계수인 $b_k \approx \bar{b}_k \approx 0$ 이다. 이는 법선 변형률 함수 $\epsilon_n(\theta)$ 와 접선 변형률 함수 $\epsilon_t(\theta)$ 가 우함수(even function)이기 때문이다. 전단 변형률의 푸리에 급수의 코사인함수의 계수인 $a_k, \bar{a}_k \approx 0$ 인 것은 $\epsilon_s(\theta)$ 가 기함수(odd function)이기 때문이다. 또한 법선, 접선 및 전단 변형률이 $a_k = 0 (k=1, 3, 5, 7)$ 이고 $b_k = 0 (k=1, 3, 5, 7)$ 인 것은 섬유/기지의 경계면 변형률이 180° 주기의 특성을 지니고 있기 때문이다. 푸리에 계수의 절대값은 섬유체적비의 증가에 따라 커지고, 낮은 차수의 푸리에 계수는 큰 차수의 계수들보다 경계면 변형률에 더 큰 영향을 미친다. 특히, 랜덤배열에서는 법선과 접선 변형률의 푸리에 계수 중 \bar{a}_0 와 \bar{a}_2 를 제외한 다른 모든 계수는 0에 근사한다. 반면에 전단 변형률의 푸리에 급수에서는 오직 2차 사인함수의 계수(second sinusoidal component)인 \bar{b}_2 만 나타난다.

Fig. 9에 묘사된 바와 같이, 횡 방향 하중의 일부는 팽창 변형률(hydrostatic strain)로, 나머지는 형상변형 변형률(strain for change of shape)로 나뉘어 표현할 수 있다. 팽창 변형률은 법선과 접선 변형

률을 발생시키고, 푸리에 급수의 계수 중 정적요소인 \bar{a}_0 로 표현된다. 형상변형 변형률은 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ 에서 양의 방향으로, $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ 에서 음의 방향으로 주기적으로 나타나기 때문에, 푸리에 급수의 계수 중 2차 코사인함수의 계수인 \bar{a}_2 로 표현된다. 전단 변형률이 법선과 접선 변형률보다 크기 때문에, \bar{b}_2 의 절대값은 \bar{a}_0 와 \bar{a}_2 의 절대값보다 더 크다.

섬유/기지의 경계면 변형률의 분산은 경계면의 모든 각도에 대해 일정하고, 섬유체적비가 증가함에 따라 커진다. Fig. 10은 섬유체적비에 따른 섬유/기지의 경계면 변형률의 표준편차를 보여준다. 표준편차는 섬유 체적비가 0.5가 될 때까지 급격히 증가하지만, 그 이상에서는 일정하게 된다. 전단 변형률의 표준편차가 가장 크고, 접선 변형률의 표준편차가 가장 작다.

Fig. 8과 Fig. 10의 결과를 보면, 섬유체적비가 증가함에 따라 미시구조적으로 섬유 배열의 불규칙성이 증가하고, 경계면 변형률이 높아지며, 표준편차의 증가로 경계면 변형률의 분포 범위가 확대된다. 즉, 섬유체적비가 증가하면서 더 많은 섬유/

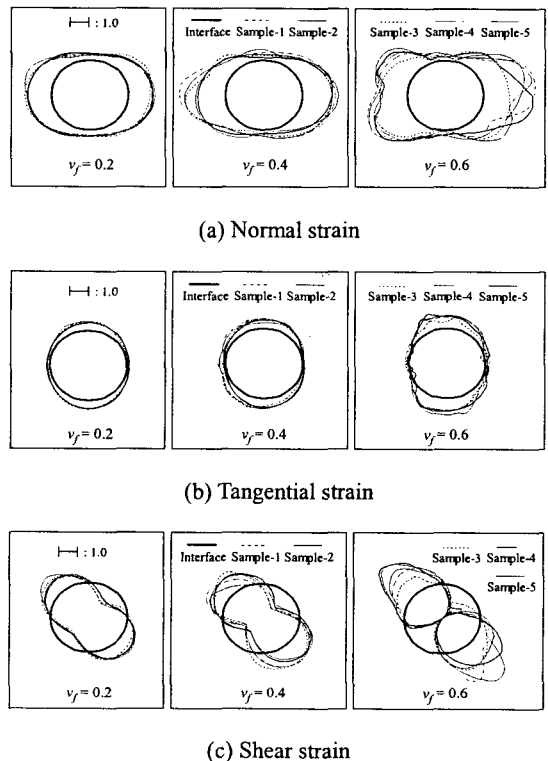


Fig. 7 Interfacial strain distributions of five selected samples from the random fiber array

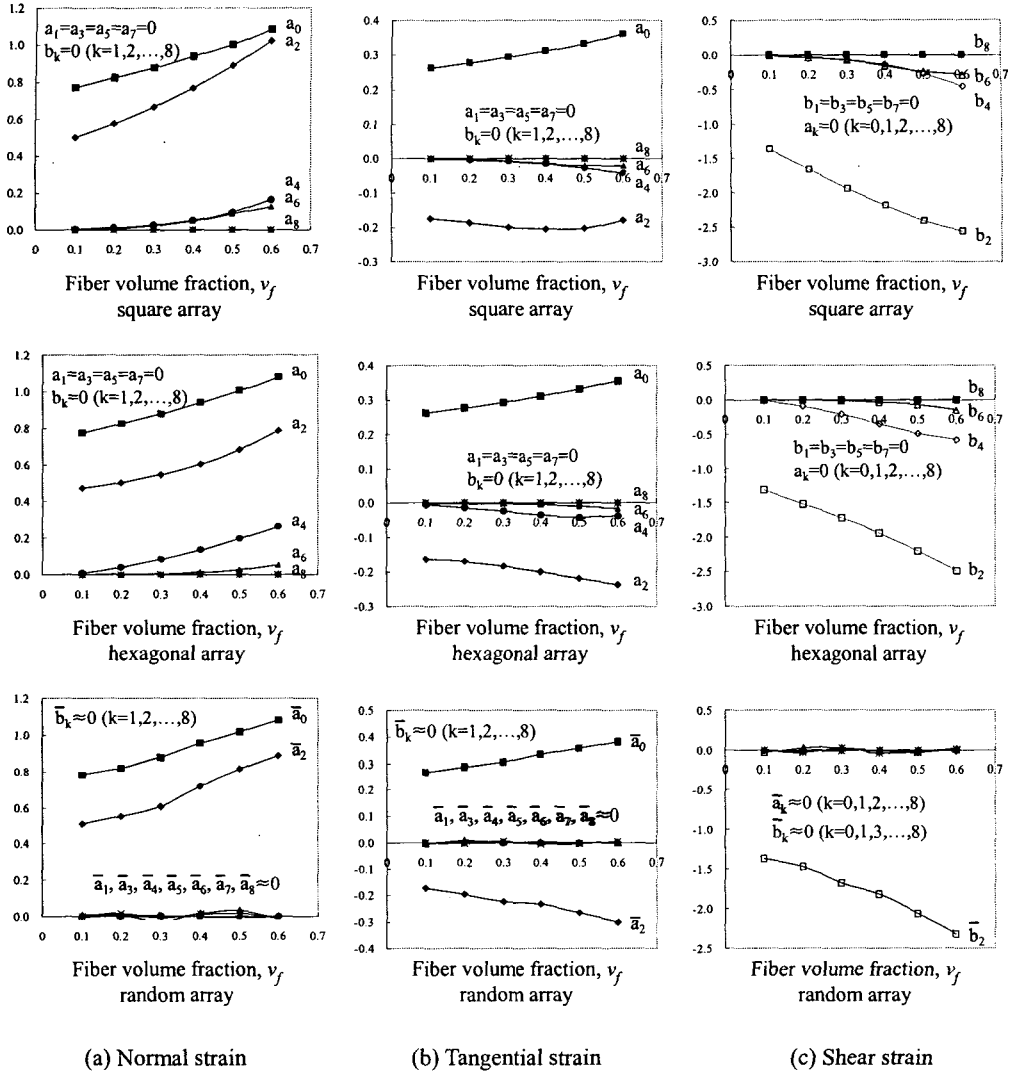


Fig. 8 Fourier coefficients of interfacial strains for the regular and random fiber arrays. Mean values are shown for the random array

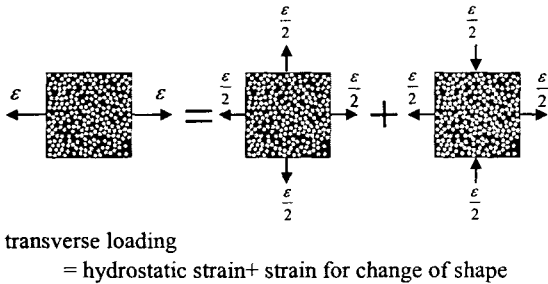


Fig. 9 Strain state in the random fiber array under transverse loading

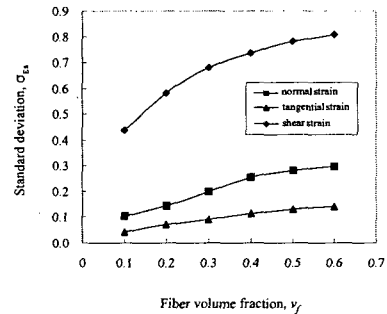


Fig. 10 Standard deviation of interfacial strains for various fiber volume fractions

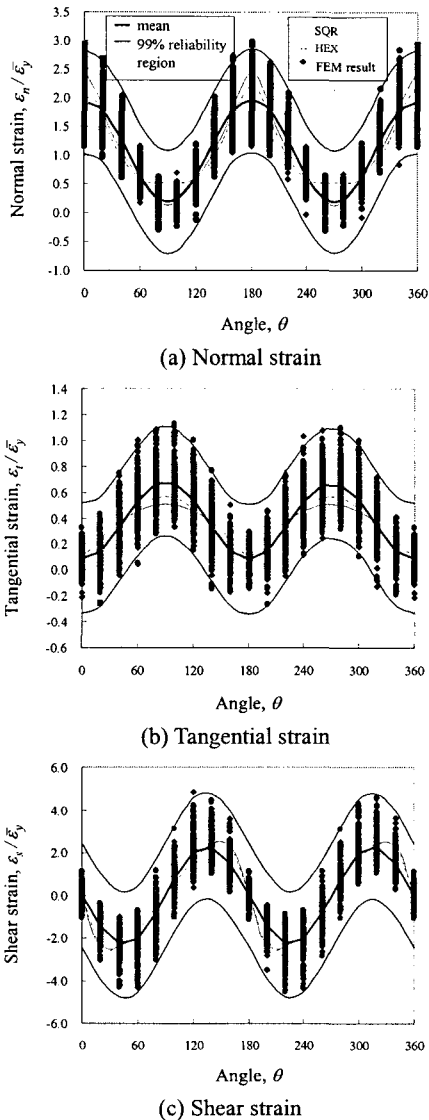


Fig. 11 Comparison of 99% reliable region of interfacial strains between FEM results and Fourier series approximations ($V_f = 0.6$)

기지의 경계면에서 높은 변형률 집중이 일어난다. 섬유/기지의 경계면 변형률 함수의 평균은 오직 푸리에 급수의 정적 요소와 2 차 사인곡선 또는 2 차 코사인곡선의 요소로 표현될 수 있고 표준편차는 섬유 체적비에 따라 일정하므로, 경계면 변형률은 푸리에 계수의 평균과 표준편차에 의해서 쉽게 계산될 수 있다.

Fig. 11 는 랜덤배열에서 섬유체적비가 0.6 일 때, 섬유/기지의 경계면 변형률과 푸리에 급수로 근사한 99%의 신뢰구간을 비교한 것이고 규칙배열의 변형률도 함께 비교하였다. 유한요소해석에 의해

도출된 경계면 변형률 분포는 푸리에 급수로 근사한 99%의 신뢰구간 안에 대부분 존재함으로써, 섬유/기지의 경계면 변형률 분포는 푸리에 계수의 평균과 표준편차로 표현할 수 있다.

앞에서 살펴 본 바와 같이, 랜덤배열에서 섬유/기지의 경계면 변형률 평균은 180° 주기를 갖는 특성이 있으며, 이러한 특성은 규칙배열의 경계면 변형률과 유사하다. 그러나, 99% 신뢰구간 사이의 경계면 변형률의 분산을 고려할 때, 실제 복합재료의 미시구조로 표현되는 랜덤배열의 경계면 변형률은 규칙배열의 것과는 의미가 다르다. 예를 들어, 섬유체적비가 0.6 일 때, 섬유/기지의 경계면 0° 에서 법선 변형률은 사각배열에서는 2.45 이고 육각배열에서는 2.20 인데 랜덤배열에서는 1.03 에서 2.85 사이의 값을 가지며, 규칙배열에서는 법선 변형률의 최대값이 하중 방향(0° 또는 180°)과 일치하였지만, 랜덤배열에서는 어느 위치에서 최대값을 보인다고 단정할 수 없다. 또, 전단 변형률의 최대값은 사각배열에서는 2.53, 육각배열에서는 2.59 로 섬유/기지의 경계면 30° 에서 나타나는 반면, 랜덤배열에서는 0 에서 4.76 의 값을 가지고 섬유/기지의 경계면 40° 근처에서 나타난다. 한 가지 중요한 사실은 비록 횡 하중을 받더라도 섬유 배열의 분포가 법선 변형률보다 전단 변형률에 더 큰 영향을 미친다는 점이다.

랜덤배열은 규칙배열보다 더 큰 변형률 집중을 야기시키며, 이는 복합재료의 좀더 쉬운 초기 손상을 가져와 낮은 강도의 원인이 된다. 랜덤배열에서는 섬유배열의 규칙성이 약해지고 주위의 섬유들의 영향이 크기 때문에 법선 변형률이 음수가 되는 즉, 압축 변형률이 관찰되지만 규칙배열에서는 이러한 현상이 나타나지 않는다. Fig. 11 에서 보듯이 규칙배열의 섬유/기지의 경계면 변형률 분포는 랜덤배열의 특별한 경우이다.

5. 결론

지금까지 복합재료가 횡 방향 하중을 받을 때, 복합재료의 섬유 배열을 규칙배열과 랜덤배열로 가정하여 섬유/기지의 경계면 변형률 분포를 섬유체적비에 따라 조사하였다. 랜덤배열에서 섬유/기지의 경계면 변형률을 표현하는데 푸리에 급수와 통계적 방법은 효과적이고, 섬유체적비 변화는 경계면 변형률의 평균과 표준편차에 큰 영향을 미친다. 규칙배열에서의 경계면 변형률 분포는 랜덤배열에서의 평균적인 경계면 변형률 분포와 유사한 하나의 특별한 경우이므로, 규칙배열의 해석이 편리한 점을 제공한다 하여도 불규칙적 섬유배열로 이루어진 실제 복합재료의 미시적 거동을 정확히 파악하는데 매우 제한적이다.

본 연구에서는 실제 복합재료의 미시적 구조와 유사한 랜덤배열의 경계면 변형률 분포를 손쉽게

파악할 수 있는 방법을 제시함으로써, 복합재료의 미시적 거동을 좀 더 정확하고 빠르게 파악할 수 있었다. 이를 바탕으로 미시적 구조가 복합재료의 초기 손상과 파손 진행에 미치는 영향을 지속적인 연구를 통하여 파악해야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Charles, L., Tucker III and Erwin, L., 1999, "Stiffness Predictions for Unidirectional Short-fiber Composites: Review and Evaluation," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 655~671.
- (2) Bednarczyk, B.A. and Arnold, S.M., 2001, "Micromechanics-based Deformation and Failure Prediction for Longitudinally Reinforced Titanium Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 705~729.
- (3) Kok, de J.M.M. and Meijer, H.E.H., 1999, "Deformation, Yield and Fracture of Unidirectional Composites in Transverse Loading-I: Influence of Fiber Volume Fraction and Test-temperature," *Composites: Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, pp. 905~916.
- (4) Laird II, G. and Kennedy, T.C., 1995, "Micromechanics of Composite Materials under Compressive Loading," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, pp. 417~430.
- (5) Berryman, J.G. and Berge, P.A., 1996, "Critique of Two Explicit Schemes for Estimating Elastic Properties of Multiphase Composites," *Mechanics of Materials*, Vol. 22, pp. 149~164.
- (6) Lamon, J., 2001, "A Micromechanics-based Approach to the Mechanical Behavior of Brittle-matrix Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 2259~2272.
- (7) Kwon, Y.W. and Berner, J.M., 1995, "Micromechanics Model for Damage and Failure Analyses of Laminated Fibrous Composites," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 52, pp. 231~242.
- (8) Brinson, L.C. and Lin, W.S., 1998, "Comparison of Micromechanics Methods for Effective Properties of Multiphase Viscoelastic Composites," *Composite Structures*, Vol. 41, pp. 353~367.
- (9) Sun, C.T. and Vaidya, R.S., 1996, "Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, pp. 171~179.
- (10) Caiazzo, A.A. and Costanzo, F., 2000, "On the Effective Elastic Properties of Composites with Evolving Microcracking," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 19, pp. 152~163.
- (11) Dong, M. and Schmauder, S., 1996, "Modeling of Metal Matrix Composites by a Self-consistent Embedded Cell Model," *Acta Materialia*, Vol. 44, pp. 2465~2478.
- (12) Sun, H., Di, S., Zhang, N. and Wu, C., 2001, "Micromechanics of Composite Materials using Multivariable Finite Element Method and Homogenization Theory," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 3007~3020.
- (13) Gosse, J.H. and Christensen, S., 2001, "Strain Invariant Failure Criteria for Polymers in Composite Materials," AIAA-2001-1184.
- (14) Gosse, J.H., 2002, "An Overview of the Strain Invariant Failure Theory (SIFT)," *Proceeding 10th US-Japan Conference on Composite Materials*, pp. 989~997.
- (15) Li, R., Kelly, D. and Ness, R., 2003, "Application of a First Invariant Strain Criterion for Matrix Failure in Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, pp. 1977~2000.
- (16) Li, R., Kelly, D. and Croksy, A., 2002, "An Evaluation of Failure Criteria for Matrix Induced Failure in Composite Materials," *Composite Structures*, Vol. 57, pp. 385~391.
- (17) Gosse, J.H., Christensen, S., Wollschlager, J.A. and Llanos, A.S., 2005, "A Strain Invariant Failure Theory (SIFT) for Composite Materials," to be published in *Journal of Composite Materials*.
- (18) Yang, S., Tewari, A. and Gokhale, M.A., 1997, "Modeling of Non-uniform Spatial Arrangement of Fibers in a Ceramic Matrix Composite," *Acta Materialia*, Vol. 45, pp. 3059~3069.
- (19) Bulsara, V.N., Talreja, R. and Qu, J., 1999, "Damage Initiation under Transverse Loading of Unidirectional Composites with Arbitrary Distributed Fibers," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 673~682.
- (20) Young-Tae Cho, 2002, "Incremental Damage Mechanics of Particle or Short-Fiber Reinforced Composites Including Cracking Damage," *KSME International Journal*, Vol. 16, pp.192~202.