

섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유종횡비와 면적비의 영향

이상동* · 김 혁* · 이동기** · 한길영** · 김이곤***

(1997년 11월 17일 접수)

Effects of Aspect and Area Ratio of Fiber on the Accuracy of Intensity Method in Measurement of Fiber Orientation-Angle Distribution

S. D. Lee, H. Kim, D. G. Lee, G. Y. Han and E. G. Kim

Key Words : Fiber Area Ratio(섬유면적비), Fiber Aspect Ratio(섬유종횡비), Intensity Method(농도법), Fiber Orientation-Angle(섬유배향각), Fiber Orientation Function(섬유배향함수), Image Processing(화상처리), Pixel(화소)

Abstract

To investigate accuracy of intensity method for measurement of the fiber orientation distribution, fiber orientation function is calculated by drawing simulation figures for the fiber orientation as varying fiber aspect ratio, fiber area ratio, and fiber orientation state, respectively. The values of fiber orientation function measured by intensity method are compared with the calculated values of fiber orientation function. The results show that measurement accuracy of the fiber orientation angle distribution by intensity method is affected by the fiber aspect ratio when the total length of oriented fiber is same. The average gradient of fiber orientation function is 0.94 for 1000 mm of the total fiber length and is 0.93 for 2000 mm when the fiber aspect ratio is over 50. Measurement accuracy by intensity method is about 94% and the reliable data can be obtained by intensity method

1. 서 론

섬유강화 고분자 복합재료는 우수한 기계적 특성 때문에 환경보호, 연비개선 및 경량화의 추세에 힘입어 항공기와 자동차 및 각종 산업분야에서 부품소재로서 응용이 급증하고 있다.⁽¹⁾ 섬유강화 고분자 복합재료는 강화재와 모재로 구성되어 있으므로 이 두 가지 성질에 의하여 소재의 기계적 특성이

달라진다. 복합재료의 성질은 모재의 성질에 의존하는 것은 당연하지만 강화재인 섬유길이, 섬유종횡비, 섬유함유율, 섬유배향상태는 복합재료의 인장강도, 피로강도, 탄성계수, 열적 및 파괴특성 등의 기계적 특성에 직접적인 영향을 미친다.

섬유강화 고분자 복합재료 내의 섬유배향 분포상태의 측정에는 제품의 성형조건의 결정이나 성형품의 역학적 특성을 규명하는데 있어 매우 중요한 인자이기 때문에 신뢰성 있는 섬유배향각 분포측정법이 확립되어야만 한다. 이와 같이 섬유배향각 측정이 매우 중요하므로 개개의 섬유배향각을 직접 측정하는 것이 정확하기는 하지만 많은 노력을 필요로 하

*조선대학교 대학원 정밀기계공학과

**회원, 조선대학교 기계공학부

***회원, 국민대학교 기계공학부

기 때문에 이 점에 대해서는 측정범으로써 바람직하지 못하다. 따라서, 이에 대한 비파괴적인 간이 측정방법에 관한 연구가 절실히 요구된다.

지금까지 섬유배향각 분포식에 관한 연구는 부직포⁽²⁾나 종이섬유⁽³⁾에 대해서 행하여지고 있으나, 섬유강화 복합재료 성형품의 경우에는 별로 없으며, 섬유배향의 지표로서 섬유배향각 분포,⁽⁴⁾ Fraunhofer 광회절상의 강도분포,⁽⁵⁾ X-선 회절강도분포⁽⁶⁾ 등의 측정으로부터 구한 표준편차, 반가폭, 피크(peak) 주위의 2차모멘트, 평균배향각 등이 사용되었다.

최근, Yaguchi 등⁽⁷⁾은 화상처리에 의해 섬유강화 열가소성 복합재료의 섬유배향각 분포를 측정하였고, 압축 및 사출 성형품에 있어서는 개개의 섬유를 식별할 수 있는 측정대상에 대해서 섬유와 주사선이 만나는 교점을 계수하여 섬유배향각 분포를 측정하였다. Kim^(8,9) 등은 화상처리를 이용한 농도법에 의해 섬유강화 복합재료의 섬유배향각 분포측정의 정밀도에 미치는 인자에 대해 고찰하였으며, Xu 등⁽¹⁰⁾은 섬유배향 분포측정시 화상변형기술(HT)을 이용하여 섬유의 위치를 직각좌표계에서 원통좌표계로 변환하는 이론적인 수식을 전개함으로써 섬유의 존재유무를 직선으로 표현하였으나 구체적인 섬유배향상태를 나타내지 못했다. 따라서, 섬유배향각 분포측정시 종합적인 배향상태를 나타낼 수 있는 정밀한 측정법이 요구된다.

본 연구에서는 농도법에 의한 섬유강화 복합재료의 섬유배향각 분포측정의 정밀도에 대해서 고찰하기 위하여, 섬유의 직경과 길이 및 배향상태를 변화시켜 섬유배향 시뮬레이션 그림을 플롯터로 작도하여 섬유배향 분포상태의 척도인 섬유배향함수 값을 구한다. 이 섬유배향 시뮬레이션 그림을 이미지 스캐너에 의해 인식하고, 이 인식된 농도정보에 의해서 섬유배향각 분포상태를 측정한다. 이때 농도법으로 측정된 섬유배향함수 값과 사전에 구한 섬유배향함수 계산값을 비교 검토하여 신뢰성 있는 섬유배향각 분포측정을 하고자 한다.

2. 섬유배향함수 및 섬유배향각 측정법

2.1 섬유배향함수

국내외에서 사용되고 있는 대부분의 섬유강화 복합재료의 두께는 폭, 길이와 비교하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급하여 섬유배

향각 분포상태를 측정한다. x-y평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우 x축과 이루는 섬유배향각 θ 는 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에 있다. 따라서, 섬유배향 분포상태의 척도를 나타내는 변수(이하 섬유배향함수 J 라고 함)와 섬유배향각 분포 $H_b(k)$ 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 있다.⁽⁷⁾

$$H_b(k) = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{1-J}{1+J} \right) \cos^2 \theta + \left(\frac{1+J}{1-J} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서, J 는 2차원적으로 섬유배향 분포상태를 나타내는 섬유배향함수이며, 섬유배향이 무배향(등방성)인 경우 섬유배향함수 값이 $J=0$ 이고, 일방향(이방성)으로만 되어 있는 경우는 $J=1$, $J=1$ 의 방향에 대해 90° 회전방향으로 배열되어 있는 경우는 $J=-1$ 이다.

2.2 섬유면적비 및 종횡비

섬유강화 복합재료의 강화제인 유리섬유는 인장에 대해 매우 강하고 강성이 있으며, 이 유리섬유의 면적비는 섬유강화 복합재료 내의 섬유함유율을 의미하므로 복합재료의 이론적 강도를 계산하는데 있어서 매우 중요하다. 또한, 유리섬유의 종횡비는 각종 물성치의 지표가 되는 가장 기본적인 인자이다.

섬유가 배향된 x-y평면상의 면적과 섬유가 놓여 있는 면적을 계산하여 구한 섬유면적비는 식 (2)와 같고,⁽⁹⁾ 배향된 섬유종횡비는 식 (3)과 같이 정의한다.^(8,11)

$$\text{섬유면적비}(F_{ar}) = \frac{\text{섬유직경} \times \text{섬유총길이}}{\text{섬유배향의 면적}} \quad (2)$$

$$\text{섬유종횡비}(l/d) = \frac{\text{섬유길이}}{\text{섬유직경}} \quad (3)$$

2.3 섬유배향각 분포측정법

Fig. 1은 섬유강화 복합재료의 연X-선 사진의 미소부분을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 검은 부분이 섬유강화 복합재료의 연X-선 촬영시 유리섬유이다. 화상처리하여 화소의 농도값으로 섬유배향각을 계산할 때 착목한 미소부분의 중심부와 주변부분과의 농도차가 없는 경우 (a)는 그 착목부분에는 방향성이 없다. 농도차가 작은 경우 (b)는 약간의 화살표 방향으로 방향성이 있다. 농도차가 더 큰 경우 (c)는 방향성이 강하다고 생각할 수 있다. 그러므로 농도차에 의해 섬유배향각을 계산할 수

있다.⁽⁷⁾

Fig. 1과 같이 화상처리하여 화소의 농도차로 섬유배향각을 계산할 때 Fig. 2에 나타난 Sobel 오퍼레이터를 이용하여 중심화상요소(이하 화소라고 함)의 수평, 수직 양방향으로 ΔH , ΔV 를 계산한 후 섬유배향각 θ 는 식 (4)에 의해 계산한다.⁽⁷⁾

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta V / \Delta H) + \pi / 2 \quad (4)$$

섬유배향각 θ 방향을 갖는 섬유수량 C 를 측정할 때 식 (5)를 이용하여 화소의 농도값으로 계산한다.

$$C = (|\Delta H| + |\Delta V|) / 2 \quad (5)$$

3. 화상처리방법

화상처리를 이용한 섬유배향각 분포측정에서 농도법의 정밀도를 비교 고찰하기 위하여 식 (1)에 의해 임의로 섬유배향상태의 적도인 섬유배향함수값과 섬유중횡비 및 섬유면적비를 컴퓨터에 입력시켜 플로터로 작성한 시뮬레이션 그림의 섬유배향함수 J 는 0.1에서 1.0사이에 0.1간격이고, 섬유중횡비는 4, 7, 10, 17, 20, 33, 50, 83, 100, 167, 250, 500의 12종류이다. 이때 플로터로 작도한 시뮬레이션 섬유의 스트랜드 길이는 2 mm, 5 mm, 10 mm, 25 mm, 50 mm의 5종류이고, 이 섬유의 스트랜드 직경은 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm의 3종류이다. 이 작도한 섬유배향 시뮬레이션 그림에서 섬유의 총길이는 1,000 mm와 2,000 mm의 2종류이며, 섬유배향의 면적은 50 mm(가로) × 50 mm(세로)이다.

Fig. 3은 섬유배향 시뮬레이션 그림의 예를 나타낸 그림이다. 섬유배향 시뮬레이션 그림의 농도정보를 인식하여 섬유배향각 분포측정에 이용된 이미지 스캐너는 일본 세이코 엘슨제 GT-4000 V이며, 해상도(resolution)는 400 × 400 화소, 1 화소는 1/8 mm × 1/8 mm, 농도계조 8비트(gray level : 256계조, 흑 : 0, 백 : 255)이다. 화상입력부의 이미지 스캐너 측정영역은 50 mm(가로) × 50 mm(세로)이다.

섬유배향 시뮬레이션 그림으로부터 얻어진 농도정보를 수치데이터로 읽어 컴퓨터로 처리하여 모든 화소에 대하여 섬유배향각 θ 와 섬유수량 C 를 구하였을 때 섬유배향각 분포 $H_b(k)$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

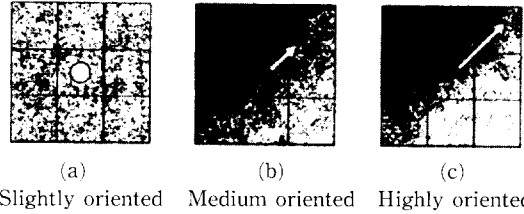


Fig. 1 Model of the minute part of the soft X-ray photograph.

$f(i-1, j-1)$	$f(i, j-1)$	$f(i+1, j-1)$
$f(i-1, j)$	$f(i, j)$	$f(i+1, j)$
$f(i-1, j+1)$	$f(i, j+1)$	$f(i+1, j+1)$

$f(i, j)$: Observation pixel

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

ΔH

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

ΔV

$$\Delta H = \{f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1)\} - \{f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1)\}$$

$$\Delta V = \{f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1)\} - \{f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1)\}$$

Fig. 2 Sobel operator of 3 × 3 pixels.

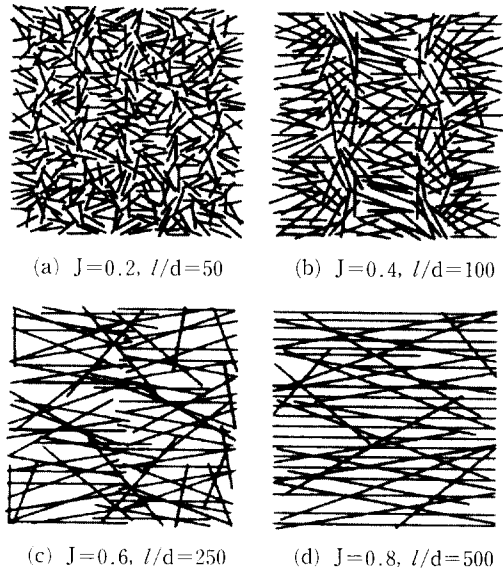


Fig. 3 Examples of simulation figure.

$$H_D(k) = \frac{N_\theta(k)}{\sum_{i=0}^{n-1} N_\theta(i)}, \quad k=0, 1, \dots, n-1 \quad (6)$$

여기서, n 은 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 분할수이며, $N_\theta(k)$ 는 $(2k-1)\pi/2n \leq \theta \leq (2k+1)\pi/2n$ 의 범위에 있는 섬유들의 윗쪽선방향 화소수이다.

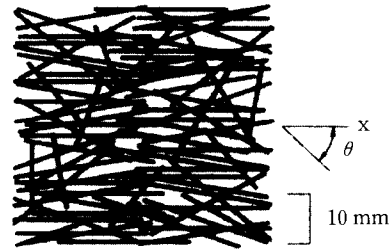
섬유배향 시뮬레이션 그림에 대해 섬유배향 분포 상태를 측정하기 위하여 측정대상 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 영역을 400×400 화소로 분할하여 이미지 스캐너로 각 화소의 농도정보를 측정하고, 얻어진 농도정보를 컴퓨터로 이치화(binary) 처리하여, 이치화의 Threshold값 보다도 농도가 높은 화소를 섬유로 하였다. 본 실험의 계측에서 Threshold값은 128이고, 섬유배향 주축은 x축을 0° 로 하고 시계방향을 정(+)으로 하여 전체 섬유에 대해 측정하였고, $0 \leq \theta < \pi$ 의 분할수 n 을 18등분해서 섬유배향각 θ 의 측정범위는 10° 이다.

섬유배향 시뮬레이션 그림으로부터 얻어진 농도정보를 이용하여 섬유배향각을 구하기 위하여 화소 각각의 섬유배향각 θ 를 식 (4)로 계산하여 구한다. 이와 같이 각 화소의 섬유배향각을 구한 후 전 화상의 모든 화소에 대하여 섬유배향각 분포 $H_D(k)$ 를 식 (6)에 의해 측정된 후 식 (1)에 의해 최소자승법으로 섬유배향함수 J 값을 구한다. 최소자승법으로 구한 섬유배향함수 J 값을 측정된 섬유배향함수 J_M 값으로 하면 섬유배향상태의 척도를 알 수 있다.

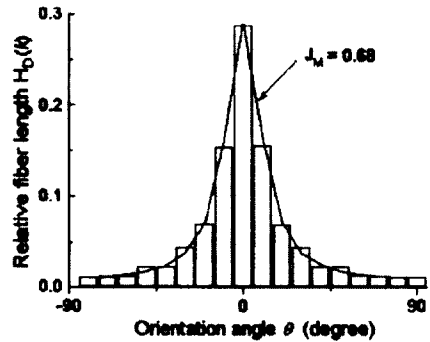
4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 섬유길이 25 mm이고, 섬유직경 0.5 mm인 경우 섬유배향 시뮬레이션 그림의 한 예를 나타낸 그림이다. 섬유배향 시뮬레이션 그림에 대해 식 (1)에 의하여 사전에 구한 섬유배향함수 J 값과 농도법에 의해 측정된 섬유배향함수 값 J_M 과의 관계에서 섬유배향 시뮬레이션 그림을 (a)에, 이 그림을 화상처리하여 농도법에 의해 각 화소에 대한 섬유배향각과 섬유수량을 측정하여 구한 섬유배향각 분포상태는 (b)에 나타났다. 이 그림에서 세로축의 상대 섬유길이는 배향된 섬유의 총길이에 대한 개개의 섬유배향각 θ 방향을 갖는 섬유의 총길이와의 비이다.

농도법으로 측정된 섬유배향함수 값 J_M 과 사전에 구한 섬유배향함수 값 J 와의 관계는 섬유길이



(a) Simulation figure for fiber orientation ($J=0.7, l/d=50, L=2,000 \text{ mm}$).



(b) Distribution of fiber orientation angle

Fig. 4 Simulation figure of planar orientation of fibers and fiber orientation distribution (Total fiber length, $L=2,000 \text{ mm}$).

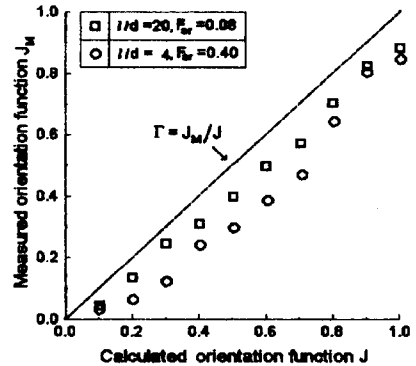


Fig. 5 Comparison between calculated orientation function and measured one for short fiber length 2 mm (Total fiber length, $L=2,000 \text{ mm}$).

2 mm, 섬유직경 0.1 mm, 0.5 mm, 배향된 섬유의 총길이 2,000 mm인 경우를 Fig. 5에, 섬유길이 50 mm, 섬유직경 0.1 mm, 0.5 mm, 배향된 섬유의 총길이 2,000 mm인 경우를 Fig. 6에 한 예로서 나타냈다.

Fig. 5는 섬유길이가 2 mm인 단섬유의 경우로

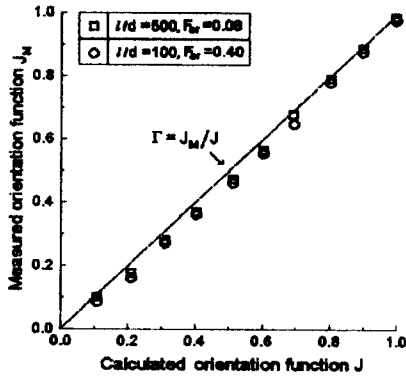


Fig. 6 Comparison between calculated orientation function and measured on for long fiber length 50 mm (Total fiber length, $L=2,000$ mm).

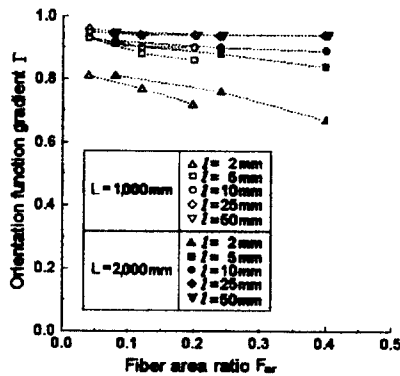


Fig. 7 Relationship between orientation function gradient Γ and fiber area ratio F_{ar} .

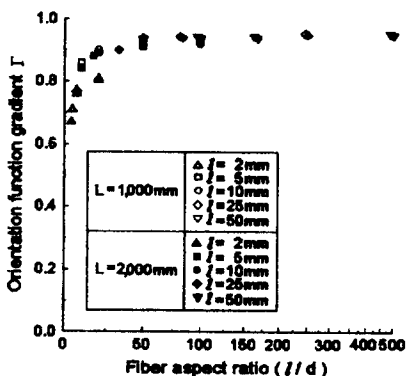


Fig. 8 Relationship between orientation function gradient Γ and fiber aspect ratio l/d .

서, 섬유직경 0.1 mm와 0.5 mm를 비교하여 보면 섬유중형비가 작은 섬유직경 0.5 mm가 0.1 mm 경우보다 섬유길이 방향에 수직인 측면, 즉 섬유직경의 차이만큼 방향성으로 많이 측정됨을 알 수 있

다. 또한, 섬유면적비가 클수록 섬유가 배향된 단위면적당 섬유길이 방향의 수직인 측면이 방향성으로 많이 측정되어 측정된 섬유배향함수 값 J_M 이 작게 측정됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 섬유길이가 50 mm인 장섬유의 경우로서, 섬유가 배향된 단위면적당 섬유길이 방향의 수직인 측면이 섬유길이 2 mm인 경우보다 매우 작기 때문에 측정된 섬유배향함수 J_M 값이 단섬유의 경우보다 아주 높게 측정됨을 알 수 있다. 또한, 섬유직경 0.1 mm와 0.5 mm를 비교하여 보면 섬유중형비가 큰 장섬유이기 때문에 섬유길이 방향의 수직인 측면이 매우 적어 섬유면적비의 영향을 별로 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6의 예와 같이 섬유배향 시뮬레이션 각각의 그림으로부터 사전에 구한 섬유배향함수 값 J 와 농도법으로 측정된 섬유배향함수 값 J_M 과의 비교값을 Γ ($\Gamma = J_M/J$)로 나타냈으며, 이 Γ 를 섬유배향함수 기울기(orientation function gradient)라 한다.

Fig. 7은 섬유배향함수 기울기(Γ)와 섬유면적비(F_{ar})와의 관계이다. 단섬유의 경우는 섬유 면적비가 클수록 단위면적당 섬유길이 방향의 수직인 측면이 방향성으로 많이 측정되기 때문에 섬유배향함수 기울기 값이 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한, 장섬유(25, 50 mm)의 경우는 단섬유(2, 5, 10 mm)의 경우와 비교하여 단위면적당 섬유길이 방향의 수직인 측면이 Fig. 3(d)의 한 예와 같이 매우 작기 때문에 이 측면이 섬유배향각으로 아주 미소하게 측정되어 섬유배향함수 기울기(Γ) 값이 섬유면적비의 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 장섬유의 경우에는 화상처리를 이용한 농도법에 의해 섬유배향각 분포상태를 정확히 측정할 수 있음을 잘 나타내고 있다.

Fig. 8은 섬유배향함수 기울기(Γ)와 섬유중형비(l/d)와의 관계이다. 이 그림에서 단섬유의 경우는 섬유길이 방향의 수직인 측면이 방향성으로 많이 측정되어 섬유배향함수 기울기 값이 섬유중형비에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 그리고, 장섬유의 경우는 섬유배향을 측정할 때 섬유길이 방향의 수직인 측면이 단섬유의 경우보다 아주 작게 측정됨을 알 수 있다. 단섬유는 중형비가 보통 20내지 60정도이고, 장섬유는 200내지 500정도이나,⁽¹¹⁾ 이 그림에 나타난 바와 같이 섬유중형비 50부터는 섬유배향함수의 평균기울기 값이 1,000 mm인 경우

는 0.94이고, 2,000 mm인 경우는 0.93으로 나타났다.

따라서, 본 연구의 결과로부터 농도법에 의한 섬유배향각 분포의 정밀도는 섬유중횡비 50이상에서 약 94%로써 신뢰성 있는 섬유배향각 분포상태를 측정할 수 있다. 본 실험에서 측정된 섬유배향함수 값 J_M 이 사전에 구한 섬유배향함수 값 J 보다 작게 측정되는 이유는 섬유면적비, 섬유중횡비의 영향과 측정오차 및 섬유가 교차하고 있는 부분에서는 섬유가 놓여있는 방향을 정확히 측정할 수 없기 때문이라고 생각된다.

본 연구의 결과로부터 x-y평면상에 놓여 있는 섬유배향각을 측정할 때 섬유중횡비가 작을수록 섬유배향각을 정확히 측정할 수 있다. 현재 시제품으로 사용되고 있는 스텝퍼블 시트를 연X-선 촬영하여 얻은 사진으로 화상처리함으로써 본 방법을 적용할 수 있다. 또한 복합재료의 두께가 얇은 경우는 평판의 두께 방향으로 몇 개의 섬유층이 형성되고 투명하지 않더라도 연X-선 촬영하면 x-y평면상에 섬유가 선명하게 잘 나타나 본 방법을 적용할 수 있으나 아주 두꺼운 복합재료에는 적용할 수 없어 앞으로 3차원적인 해석방법이 요구된다.

5. 결 론

섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유중횡비와 면적비의 영향에 대해 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 농도법에 의하여 섬유배향 분포상태를 측정할 때 배향된 섬유의 총길이가 동일한 경우 장섬유는 단섬유와 비교하여 단위면적당 섬유길이 방향의 수직인 측면이 매우 작기 때문에 측정된 섬유배향함수 값은 섬유면적비와 섬유중횡비의 영향이 미소하나, 단섬유의 경우는 섬유면적비와 중횡비에 큰 영향을 받을 수 있다.

(2) 배향된 섬유의 총길이가 동일한 조건에서 섬유배향각 분포측정의 정밀도에 미치는 섬유중횡비의 영향을 고찰하여 섬유배향함수의 평균기울기 값은 섬유중횡비 50이상에서 섬유의 총길이가 1,000 mm인 경우는 0.94이고, 2,000 mm인 경우는 0.93이며, 농도법에 의한 섬유배향각 분포측정의 정밀도는 약 94%로써 신뢰성 있는 섬유배향 분포상태를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학: ME96-E-29)에 의하여 연구되었으므로 이에 감사말씀 드립니다.

참고문헌

- (1) 조선형, 임영호, 김이곤, 1994, "압축성형된 한 방향 섬유강화 고분자 복합재료의 섬유함유율 분포," 한국복합재료학회지, 제7권, 제3호, pp. 67~76.
- (2) Hearle, J. W. S. and Ozsanlav, V., 1979, "45-Studies of Adhesive-bonded Non-woven Fabrics, Part III: The Determination of Fibre Orientation and Curl," *J. Text. Inst.*, No. 11, pp. 487~498.
- (3) Kallmes, O. J. and Gloria Bernier, 1964, "The Structure of Paper VIII. Structure of Idealized Nonrandom Networks," *Tappi*, Vol. 47, No. 11, pp. 694~703.
- (4) 山田國廣, 堀川 明, 1984, "2次元纖維集合體の確率幾何," *纖維機械學會誌*, Vol. 37, No. 12, pp. 51~64.
- (5) 堀川 明, 寺岡文雄, 1980, "FRP中の纖維配向角評價法, (第2報)ファウンホーファ回折像による配向角評價の實際," *纖維機械學會誌*, Vol. 33, No. 7, pp. 47~50.
- (6) Menendez, H. and White, J. L., 1984, "A Wide-Angle X-Ray Diffraction Method of Determining Chopped Fiber Orientation in Composites with Application to Extrusion Through Dies," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol. 24, No. 13, pp. 1051~1055.
- (7) Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E. G., 1995, "Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing," *Intern. Polymer Processing*, Vol. X, Issue 3, pp. 262~269.
- (8) 이동기, 이상동, 한길영, 김이곤, 1996, "섬유강화 복합재료의 배향측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 중횡비의 영향," *大韓機械學會 秋季學術大會 論文集 A*, pp. 549~554.

- (9) 김 혁, 이상동, 이동기, 한길영, 김이근, 1996, "섬유강화 복합재료의 배향측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유면적비의 영향," 大韓機械學會 秋季學術大會 論文集 A, pp. 1124~1129.
- (10) Xu, B. and Yu, L., 1997, "Determining Fiber Orientation Distribution in Nonwovens with Hough Transform Techniques," *Textile Research Journal*, Vol. 67, No. 8, pp. 563~571.
- (11) Kalpakjian, S., 1991, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 665~666.