

論文

장섬유강화 고분자 복합판의 섬유배향각 분포측정에
있어서 농도법의 정밀도

김 혁* · 이동기* · 한길영** · 김이곤***

Accuracy of Intensity Method for the Measurement of Fiber Orientation
Distribution of Long Fiber-Reinforced Polymeric Composites

Hyuk Kim*, Dong-Gi Lee*, Gil-Young Han** and E-Gon Kim***

ABSTRACT

To investigate the accuracy of intensity method for the measurement of the fiber orientation distribution, the fiber orientation distribution of long fiber-reinforced polymeric composites is measured using image processing. Theoretical results of fiber orientation function are compared with the experiments for the composites with different fiber contents and fiber orientations. In the experiments the intensity method is used for the fiber orientation function.

The results show that, firstly, the characteristics of fiber orientation can be represented by the fiber orientation function, J and the measured fiber orientation function, J_M is related to the theoretical fiber orientation function J as $J_M = 0.81J$. Secondly, for the measurements of fiber orientation distribution, the intensity method is found to be very effective since it uses the intensity difference in the measuring ranges. Finally, the accuracy of the intensity method is improved as the clash of the fiber is decreased

초 록

장섬유강화 고분자 복합판의 섬유 배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 대해서 고찰하기 위하여 화상처리법으로 측정하였다. 실험 방법으로는 섬유함유율과 섬유배향 상태를 변화시켜 시험편을 제작한 후 제작된 시험편에 대하여 농도법으로 측정한 섬유 배향함수 값과 계산된 섬유 배향함수 값을 비교하였다. 본 연구에서 섬유배향의 정도는 섬유 배향함수 J 로 정량적으로 나타낼 수 있으며, 측정된 섬유 배향함수 J_M 과 계산된 섬유 배향함수 J 와의 관계는 $J_M = 0.81J$ 라는 측정값을 얻었다. 농도법은 측정 영역의 농도차에 의해서 섬유 배향각 분포를 측정하기 때문에 섬유의 겹침이 작은 시험편에서는 매우 유효하게 측정할 수 있다.

1. 서 론

장섬유강화 고분자 복합판을 고온압축 유동성형

(2차가공)하면 성형과정 중 재료의 유동에 의해서 모재와 강화재의 분리 및 섬유의 배향이 발생하여 성형품은 불균질하게 된다. 즉, 유동속도차에 의

* 조선대학교 정밀기계공학과

** 조선대학교 선박해양공학과

*** 국민대학교 기계설계학과

하여 섬유함유율의 분포가 성형품의 각 부분마다 다르게 되고, 변위차에 의해 섬유의 배향이 생기기 때문에 성형품의 강도 및 특성에 변화가 생긴다. 그러므로 섬유강화 복합재료를 이용한 부품의 압축성형에 있어서 성형품의 섬유배향 상태는 각종 물성치의 지표가 되는 가장 기본적인 인자이다. 때문에 성형품의 섬유 배향각 분포가 어떠한 식으로 표시되는가와 섬유 배향각 분포의 측정법을 확립하여 섬유배향의 정도를 밝혀두는 것은 재료설계, 적정 성형조건의 결정, 성형품의 역학적 특성 등을 예측하는데 있어서 매우 중요하다.

지금까지 섬유 배향각 분포의 표시식에 관한 연구는 부직포나 종이섬유인 경우에 대해서 행하여지고 있으나, 유리섬유강화 복합재료 성형품의 경우에는 별로 없다. 섬유 배향각 분포측정은 중요함에도 불구하고, 성형품 중에 개개의 섬유를 식별할 수 있는 경우에 대해서만 행하여지고 있다 [1~2].

그러나 스템퍼블 시트에서와 같이 강화재인 유리섬유 매트구조는 개개의 섬유가 다수의 필라멘트를 집속한 스트랜드로부터 구성되고, 이것은 루프로 해서 매트상으로 적층한 복잡한 구조로 되어 있다. 이 재료에 대해서는 섬유 배향각 분포의 측정·평가가 중요함에도 불구하고 그 측정은 곤란하다. 이와같은 섬유가 복잡한 구조로 되어 있는 성형품의 섬유 배향각 분포평가에는 Fraunhofer 회절상의 강도분포, X-선 회절강도 분포 및 전자파의 응용 등으로부터 구한 표준편차, peak 주위의 2차모멘트, 평균배향각 등에 의한 간접적 평가법이 취해지고 있고, 섬유 배향각 분포를 직접 측정하는 방법은 행하여지지 않고 있다 [3~5].

최근, Yaguchi 등은 복합재료의 섬유 배향각 분포측정에 있어서 단섬유의 배향은 교점계수법을 이용하여 측정하였으며, 장섬유의 경우는 Prewitt 오퍼레이터를 이용하여 화상처리 방법으로 측정하였다 [6]. 필자들은 Sobel 오퍼레이터를 이용하여 장섬유의 배향각 분포를 측정하여 Prewitt 오퍼레이터와 비교하였다 [7].

본 연구에서는 섬유 배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 대해서 고찰하기 위하여 임의로

섬유 배향함수를 주고 플로터로 작성한 섬유배향 시뮬레이션 그림을 농도법으로 섬유 배향각 분포를 측정한다. 여기서 임의로 주어진 섬유 배향함수 값과 농도법으로 측정한 섬유 배향함수 값을 비교 검토한다. 또한 압축성형된 장섬유강화 고분자 복합판의 섬유 배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유 함유율과 배향상태의 영향에 대해서 고찰하기 위하여, 프레스 성형용으로 개발된 열가소성 플라스틱의 모재에 섬유함유율과 배향상태의 척도인 섬유 배향함수를 변화시켜 장섬유로 강화시킨 장섬유강화 고분자 복합판을 만들어서 섬유 배향함수를 계산한다. 다음에 이 시험편을 연 X-선 촬영하고 이 사진 농도를 이미지 스캐너에 의해 인식하여 섬유 배향각 분포를 측정한다. 여기서 계산된 섬유 배향함수 값과 필자들이 제안한 농도법으로 측정한 섬유 배향함수 값을 비교 검토한다.

2. 이 론

2-1. 섬유 배향함수

섬유배향은 장섬유강화 고분자 복합판의 두께가 폭과 길이에 비하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급하여 섬유 배향각 분포가 어떠한 식으로 표시되는가를 밝혀두고, 또 섬유 배향각 분포의 측정법에 대해서 검토한다.

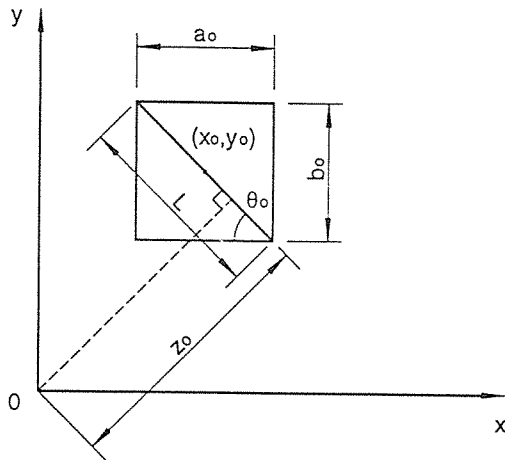
Fig.1은 섬유 배향각 분포 $q(\theta)$ 식 유도에 사용하는 좌표계이다. 집합체가 x축 방향에 α 배, y축 방향에 β 배 신장되었을 때 집합체의 변형과정에 대해서 다음의 가정을 세운다 [8].

① 집합체의 변형에 의해서 섬유길이는 변화하지 않는다.

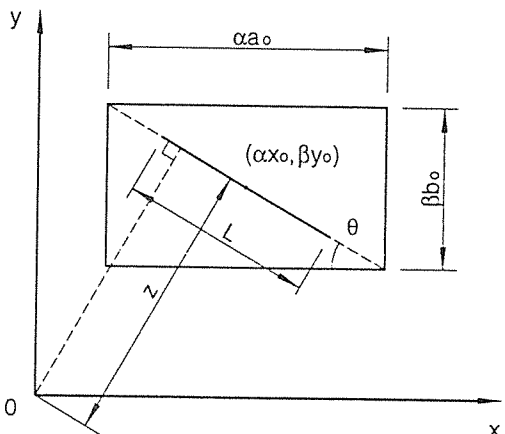
② 초기상태에서 임의의 한개의 섬유가 접해 있는 사각형 면적 $a_0 \times b_0$ 는 집합체 변형후 $\alpha a_0 \times \beta b_0$ 의 직사각형이 되어 섬유는 이 변형한 직사각형의 대각선상에 온다.

③ 초기상태에서 임의의 한개의 섬유중심점 좌표 x_0, y_0 는 집합체 변형후 $\alpha x_0, \beta y_0$ 로 된다.

섬유 집합체의 변형전 섬유 배향각 θ_0 와 배향후



(a) Before molding



(b) After molding

Fig. 1. Fiber orientation model in two dimension

섬유 배향각 θ 는

$$\tan \theta_0 = \frac{b_0}{a_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\tan \theta = \frac{\beta b_0}{\alpha a_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\beta \tan \theta_0}{\alpha} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

식(3)을 θ_0 에 대해서 미분하면

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{\alpha \tan \theta}{\beta} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d\theta_0}{d\theta} = \frac{\alpha \beta}{\alpha^2 \sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \theta} \quad \dots\dots\dots (5)$$

초기상태에 있어서 섬유 배향각 분포 $q(\theta_0)$ 는 $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ 의 일정한 분포이기 때문에

$$q(\theta_0) = \frac{1}{\pi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

변형후의 섬유 배향각 분포 $q(\theta)$ 는 식(5), (6) 으로부터

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha \beta}{\alpha^2 \sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \theta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

섬유 배향각 분포 식(7)을 Stein 등이 제안한 배향함수 J 로 나타내면 식(8)과 같다.

$$J = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta q(\theta) d\theta - 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos 2\theta q(\theta) d\theta$$

식(8)을 우함수로 표시하고, 식(7)을 대입하면

$$\begin{aligned} A(2k) &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos 2k\theta q(\theta) d\theta \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos 2k\theta d\theta}{\left(\frac{\beta}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \cos^2 \theta + \frac{\alpha}{\beta}} \quad \dots\dots (9) \end{aligned}$$

여기서 $\theta = \frac{x}{2}$, $d\theta = \frac{dx}{2}$ 이므로

$$\begin{aligned} A(2k) &= \frac{2}{\pi} \int_0^x \frac{\cos kx dx}{\left(\frac{\beta}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \cos x + \left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\alpha}{\beta} \right)} \\ &= \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right]^k \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

여기서 k 의 급수는 $0 \leq A(2k) \leq 1$ 로서, k 값이 1인 경우가 섬유 배향함수에 영향을 가장 크게 미치므로 $k=1$ 로 한다.

식(8), (10)으로부터 $J=A(2)$ 가 되어서 식(10)을 변형하면

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{(1-J)}{(1+J)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

식(11)을 식(7)에 대입하여 섬유 배향각 분포 $q(\theta)$ 식을 구하면 식(12)와 같다.

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{1-J}{1+J} \right) \cos^2 \theta + \left(\frac{1+J}{1-J} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

여기서 J는 2차원 섬유 배향각 분포에 대한 섬유 배향함수이며, 섬유배향이 등방성인 경우 J=0, 한 방향으로만 배열되어 있는 경우는 J=1, J=1의 방향에 대해 90° 회전방향으로 배열되어 있는 경우는 J=-1이다[8].

Fig.2는 식(12)의 섬유 배향각 θ 와 상대섬유 길이와의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 상대 섬유길이는 전 섬유의 총 길이에 대한 개개의 섬유 배향각 θ 방향을 갖는 섬유의 총 길이와의 비이다. 이 그림에서 섬유 배향함수 J=1일 때는 배향 주축과 일직선의 관계를, J=0일 때는 배향 주축과 직각의 관계를 각각 나타내고 있다.

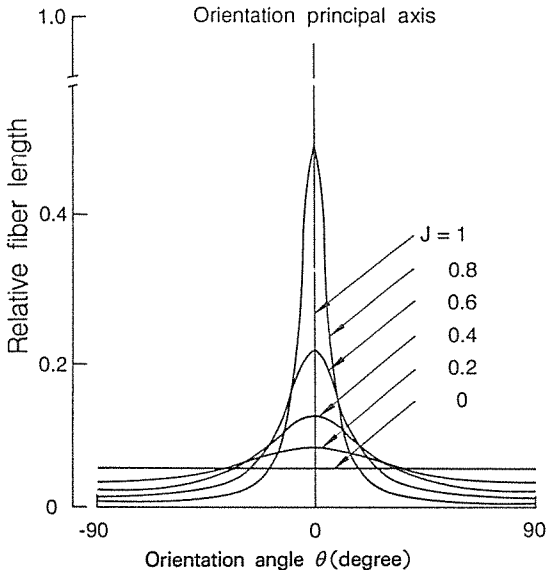
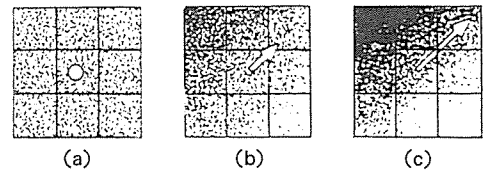


Fig.2. Distribution of relative fiber length according to the fiber orientation angle

2-2. 농도법

농도법은 측정영역의 모든 화소에 대하여 측정하기 때문에 섬유가 서로 강하게 엉켜져 있는 상태, 즉 섬유 하나 하나를 식별할 수 없는 경우의 섬유 배향각 분포를 구할 수 있다[6].

Fig.3에 나타낸 바와 같은 연X-선 사진의 미소부분의 모델에 대해 생각한다. 이 그림에서 점은 부분이 유리섬유이다. 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 농도차가 있는 경우는 농도차에 의해 섬유 배향각의 방향을 판단할 수 있다.



(a) Slightly orientation (b) Medium orientation (c) Highly orientation

Fig.3. Model of the minute part of the soft X-ray photograph

사진의 농도차로 화상처리를 함으로써 물체윤곽선(edge)의 검출은 Fig.4에 나타낸 바와 같이 Sobel 오퍼레이터를 이용하여 중심화상요소(이하 화소라고 함)의 수평, 수직 양방향으로 ΔH , ΔV 를 계산한다[9]. 인접화소와의 농도차 ΔG 로 윤곽선을 검출하며, ΔG 값이 Threshold값 보다 큰 경우를 윤곽선으로 한다.

$$\Delta G = (|\Delta H| + |\Delta V|) / 2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

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

Observation pixel(i, j)

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

ΔH

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

ΔV

$$\begin{aligned} \Delta H &= \{f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1)\} \\ &\quad - \{f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1)\} \\ \Delta V &= \{f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1)\} \\ &\quad - \{f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1)\} \end{aligned}$$

Fig.4. Sobel operator of 3×3 pixel

또, 물체의 윤곽선방향 θ 는 식(14)와 같다.

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta V / \Delta H) + \pi/2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

연X-선 사진으로부터 얻어진 농도정보에서 모든 화소에 대하여 섬유 배향각 θ 와 ΔG 를 구하였을 때 섬유 배향각 분포는 식(15)와 같다.

$$H_D(k) = \frac{N_\theta(k)}{\sum_{i=0}^{n-1} N_\theta(i)}, \quad k=0, 1, \dots, n-1 \quad \dots (15)$$

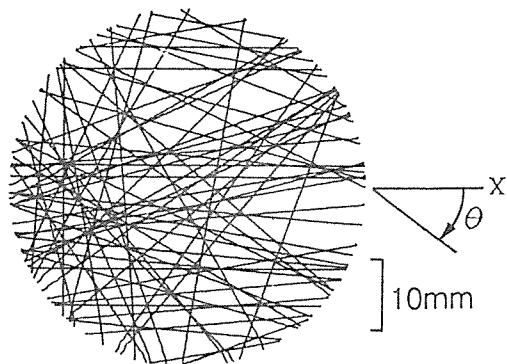
여기서 n 은 $0 \leq \theta < \pi$ 의 분할수이며, $N_\theta(k)$ 는 $(2k-1)\pi/2n \leq \theta \leq (2k+1)\pi/2n$ 의 범위에 있는 물체의 윤곽선방향 화소수이다. 이와같이 식(15)로 측정된 $H_D(k)$ 로부터 최소자승법에 의하여 섬유 배향함수 J 를 구한다. 본 실험의 계측에서 사용한 Threshold 값은 섬유함유율이 10wt%이고 2 strand이며 섬유 배향함수 $J=1$ 인 경우를 기준하여 Table 1에 나타낸 바와같이 Threshold 값을 변화시켜 측정하였으며, 이때 계산된 섬유 배향함수값에 가장 유사하게 접근한 64를 Threshold값으로 결정하였다. 섬유배향 주축은 x축을 0° 로, 시계방향을 정(+)으로 하고 또, n 을 18등분해서 θ 의 범위는 10° 이고 연X-선 사진 농도정보를 이용하여 측정된 섬유 배향각 분포 $H_D(k)$ 로부터 식(12)에 의해 구한 섬유 배향함수 J 를 측정된 섬유 배향함수 J_M 으로 하면 성형품의 섬유배향 상태를 알 수 있다.

Table 1. Values of measured orientation function J_M when $J=1$

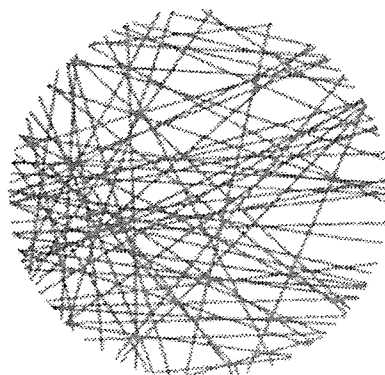
Threshold	16	32	64	128
Measured orientation function J_M	0.78	0.83	0.87	0.85

3. 실험

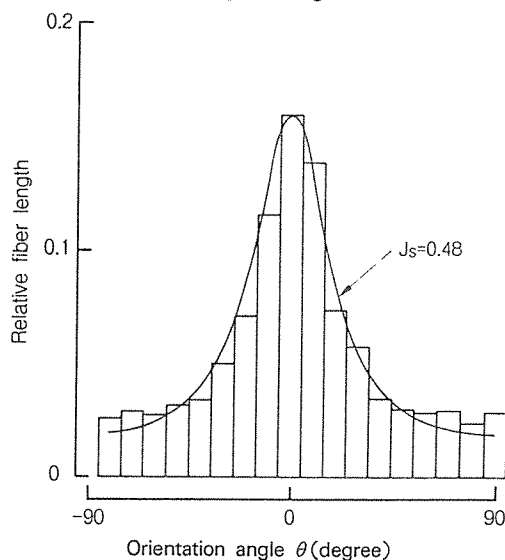
섬유 배향각 분포의 표시식을 검토하고 섬유 배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 대해 비교 검토하기 위하여 식(12)에 의해 임의의 섬유 배향함수 J 값을 컴퓨터에 입력시켜 플로터로 작성한 시뮬레이션 섬유 배향함수 $J_s=0.05, 0.19, 0.22, 0.36, 0.48, 0.56, 0.60, 0.78, 1.0$ 이다. 이때 플로터로 작도한 시뮬레이션의 섬유직경은 0.2mm,



(a) Simulation figure for long fibers



(b) Image of long fibers



(c) Fiber orientation distribution

Fig. 5. Simulation figure and fiber orientation distribution of specimen ($J_s=0.48$, $L=2,000$ mm, angle step = 5°)

총 섬유 길이 1,000mm와 2,000mm의 2종류이고 작도직경은 50mm이며, Fig.5에서 장섬유배향 시뮬레이션 그림의 한 예를 (a)에 농도차에 의해 윤곽선 정보로 처리된 그림의 한 예를 (b)에 이 그림에 대한 섬유 배향각 분포상태를 (c)에 나타냈다.

그리고 농도법의 정밀도에 미치는 섬유함유율과 배향상태의 영향에 대해서 고찰하기 위하여, 프레스 성형용으로 개발된 열가소성 플라스틱의 모재에 섬유배향 상태의 척도인 섬유 배향함수와 섬유함유율을 변화시킨 다음 열압축프레스(Carver Model 2697)를 사용하여 장섬유강화 고분자 복합판을 제작하였다. 이때 성형온도는 200℃이다. 미리 주어진 계산된 섬유 배향함수 J 는 0.1에서 1.0 사이에 0.1간격으로, 섬유함유율은 5wt%, 10wt%, 20wt% 3종류로 하였다. 실험에 사용한 글라스 화이버는 한국베트로텍스(주)에서 구입한 E-글라스(no-alkali glass)인 안(필라멘트 직경: 5~13 μ m, 1m당 꼬인 횟수: 20~40번)제품이고, 글라스 스트랜드의 굵기는 1줄, 2줄, 4줄로 변화시켰으며, 총 섬유의 길이는 2,050mm, 4,100mm, 8,200mm, 시험편의 규격은 50mm×50mm×(3~3.5)mm이다. Fig.6은 제작한 시험편의 구조를 나타낸 한 예이다.

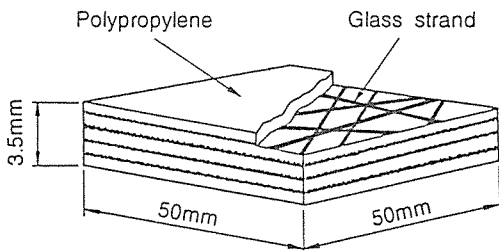


Fig.6. Structure of specimen

섬유 배향함수 J 를 측정하기 위하여 50mm×50mm의 영역을 화상처리하고, 섬유 배향각 θ 는 시험편의 x축을 기준으로 시계방향과 반시계방향의 전 섬유에 대해서 측정한다. 측정대상을 화소로 분할하여 이미지 스캐너로 화소의 농도정보를 측정하고, 얻어진 농도정보를 컴퓨터로 이치화 처리하여, 이치화의 Threshold값 보다도 농도가 높은 화소를 섬유로 한다.

성형품의 연X-선 사진 농도로서 섬유 배향각 분포측정에 이용한 이미지 스캐너는 일본 세이코 엠슨제 GT-4000V이며, 해상도(resolution)는 400×400화소, 1화소는 1/8mm×1/8mm, 농도계조 8비트(gray level: 256계조)이다. 그리고 플로터는 일본 WATANABE사(WX4671)에서 제작한 것이며, 연X-선 발생장치는 일본 아코마 HF-46(mammography)이며, 필름은 일본 후지사 제품(MI-NC의 료용 X-ray필름, 180mm×240mm)이다. 연X-선 촬영 및 현상조건은 Table 2와 같다. X-선의 구별은 X-선 발생장치로부터 X-선을 발생시킬 때 최대 kVp(kilo Voltage peak)가 150이상의 X-선을 경X-선, 그 이하의 경우를 연X-선이라고 한다. 성형품의 두께가 얇고, 단위면적당 섬유함유량이 적어 압축비에 관계없이 동일 조건으로 촬영하였다. 화상입력부의 이미지 스캐너 측정영역은 50mm(가로)×50mm(세로)이며, 성형품의 농도정보를 수치 데이터로 읽어 컴퓨터 처리하여 출력한다.

Table 2. Condition of photographing and developing for soft X-ray

V	A	D	S.S	F.S	D.T	S.T
35	40	25	18	18	29	34

V : Voltage(kVp) A : Electric current(mAs)
D : Developer(sec) S.S : Stopping solution(sec)
F.S : Fixing solution(sec)
D.T : Dry time(sec) S.T : Solution temperature(℃)

4. 결과 및 고찰

농도법의 유용성을 섬유배향 시뮬레이션 그림을 이용하여 알아보기로 한다. 한 예로서 Fig.5(a)와 같이 섬유 배향각 분포를 미리 알고 있는 섬유배향 시뮬레이션 그림을 400×400 화소로 분할해서 농도정보를 입력한다. 농도법에 의해 섬유 배향각 분포를 구하기 위해 시뮬레이션 그림에서 얻어진 농도정보를 식(15)에 의해서 섬유 배향각 분포 $H_D(k)$ 를 측정하여 식(12)에 의하여 섬유 배향함수 J_M 을 구한다. 이때 섬유의 배향각 θ 는 x축 방향을 기준으로 시계방향과 반시계방향의 전 섬유에 대해서 측정하였으며, 측정된 상대섬유길이와 섬유

배향각 분포와의 관계로부터 구한 섬유 배향함수 J_M 은 Fig. 7에 나타냈으며 그 결과는 매우 유사하게 나타났다. 이와같이 섬유배향의 정도는 섬유 배향함수 J 로서 정량적인 평가를 할 수 있다. 여기서 상대섬유길이는 전 섬유 총 길이의 화소수에 대한 개개의 섬유 배향각 θ 방향의 화소수와 비이다.

농도법에 의해 측정된 섬유 배향함수 J_M 과 시

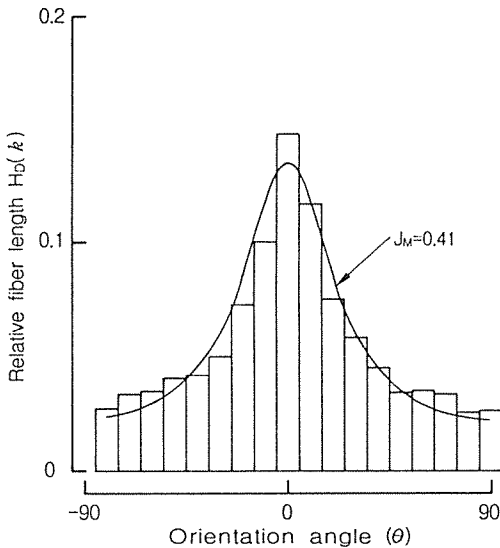


Fig. 7. Measured fiber orientation function J_M for simulation figure ($J_s = 0.48$)

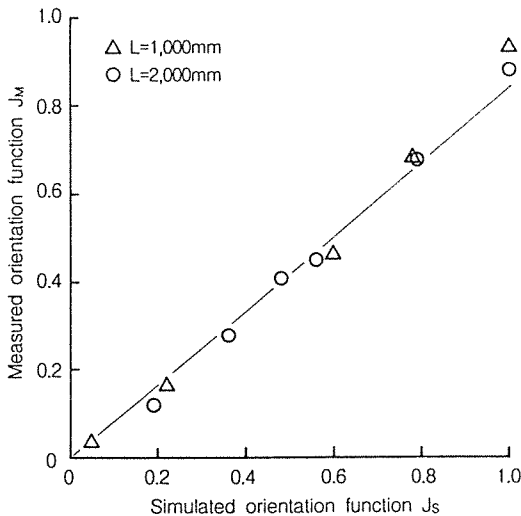


Fig. 8. Comparison between simulated orientation function and measured one for long fibers

뮬레이션 섬유 배향함수 J_s 와의 관계를 Fig. 8에 나타냈으며, J_M 과 J_s 와의 비교값은 Table 3에 나타냈고 그 평균값은 $J_M = 0.84J_s$ 이다.

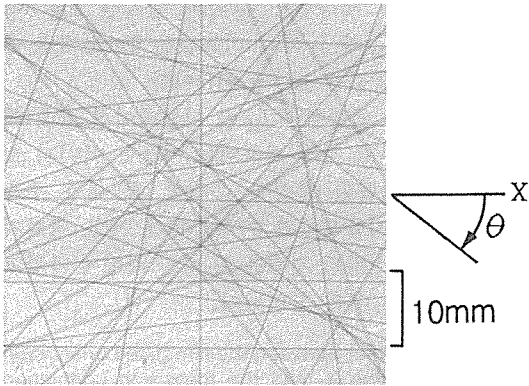
측정된 섬유 배향함수 J_M 이 시뮬레이션 섬유 배향함수 J_s 보다도 적게 측정되는 이유는 이미지 스캐너로부터 입력된 화상을 측정할 때 배향 주축 방향에 있는 시뮬레이션 가상섬유가 서로 겹치기 때문이다. 또 섬유의 겹침은 한 방향 배향에 가깝고 섬유량이 많을 수록 늘어난다.

Table 3. Gradient between the simulated orientation function J_s and the measured orientation function J_M

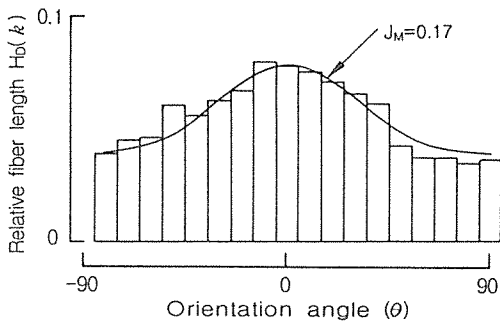
Specimen	Fiber length	
	L = 1,000mm	L = 2,000mm
Gradient	0.85	0.83

Fig. 9~Fig. 14의 (a)는 열가소성 플라스틱의 모재에 섬유함유율과 배향상태를 변화시켜 장섬유로 강화시킨 장섬유강화 고분자 복합판의 연X-선 사진으로서 이 사진에서 검은부분이 강화재인 유리 섬유이고 흰부분이 모재인 폴리프로필렌이다. 이 사진으로부터 섬유량이 많을 수록 농도가 높고, 그 농도의 극대부분 농선방향이 섬유의 방향이라 할 수 있다. Fig. 9~Fig. 14의 (b)는 농도법에 의해서 얻은 섬유 배향각 θ 와 상대섬유길이와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 섬유 배향함수 $J = 1$ 에 가까울 수록 섬유배향 상태가 이방성이고, $J = 0$ 에 가까울 수록 섬유배향 상태가 등방성임을 알 수 있다.

농도법에 의한 섬유 배향각 분포측정을 위해 성형품의 연X-선 사진에서 얻어진 농도정보를 식 (15)에 의해서 섬유 배향각 분포 $H_D(k)$ 를 측정하고 식 (12)에 의하여 섬유 배향함수 J_M 을 구한다. $H_D(k)$ 로부터 결정되는 섬유 배향함수 J_M 은 섬유 함유율 및 스트랜드 굵기 별로 Fig. 15~Fig. 17에 나타냈고, 앞에서 성형품으로부터 계산된 섬유 배향함수 J 값과 농도법에 의해 측정된 섬유 배향함수 J_M 값을 비교하여 Table 4에 나타냈으며, 그 평균값은 $J_M = 0.81J$ 이다. 계산된 J 에 비해 측정된 J_M 은 낮은 값이지만 J 과 J_M 에는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이와같이 측정된 섬유 배향함수 J_M 이 주



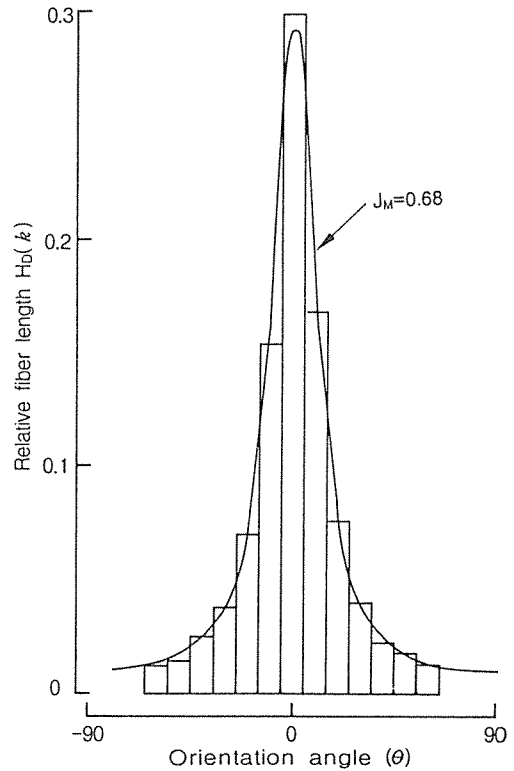
(a) Soft X-ray photograph of specimen



(b) Fiber orientation function J

Fig.9. Soft X-ray photograph and orientation function($J=0.3$, 5wt%, 1 strand)

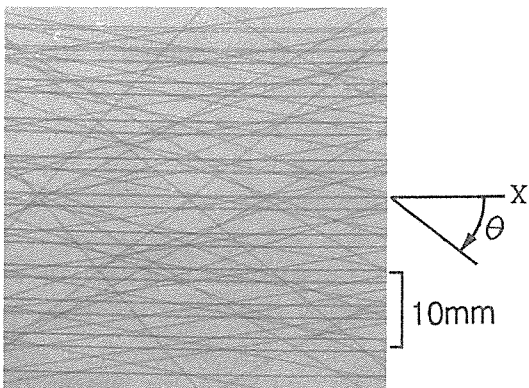
어진 섬유 배향함수 J 보다 적게 예측되는 이유는 섬유량에 비례하는 농도차를 직접 섬유량으로 하며



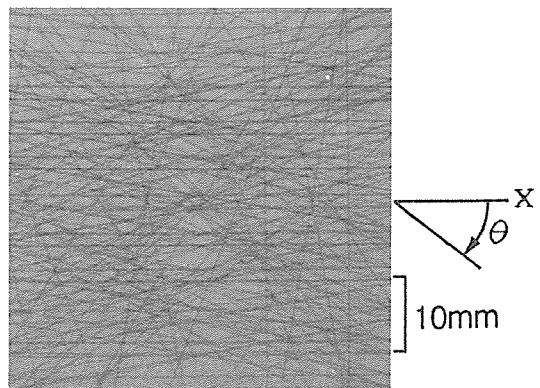
(b) Fiber orientation function J

Fig.10. Continued

복합판을 적층할 때 섬유가 서로 겹칠 뿐만 아니라 섬유가 교차하고 있는 부분에서는 정확한 방향을 측정할 수 없고, 글라스 스트랜드 굵기의 영향 및

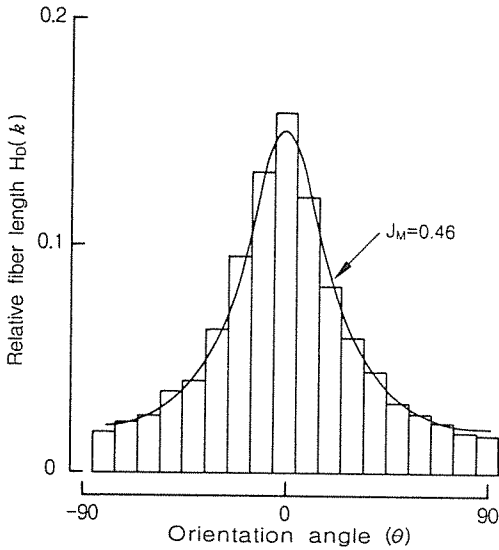


(a) Soft X-ray photograph of specimen

Fig.10. Soft X-ray photograph and orientation function($J=0.8$, 10wt%, 1 strand)

(a) Soft X-ray photograph of specimen

Fig.11. Soft X-ray photograph and orientation function($J=0.6$, 20wt%, 1 strand)



(b) Fiber orientation function J

Fig. 11. Continued

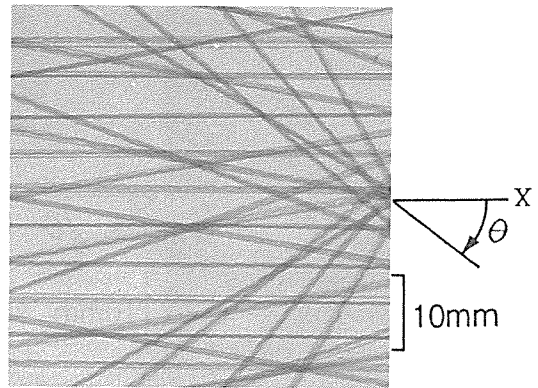
Table 4. Gradient between the calculated orientation function J and the measured orientation function J_M

Strand	Gradient		
	Fiber content 5wt %	Fiber content 10wt %	Fiber content 20wt %
1 Strand	0.74	0.77	0.82
2 Strand	0.74	0.82	0.85
4 Strand	0.85	0.84	0.82

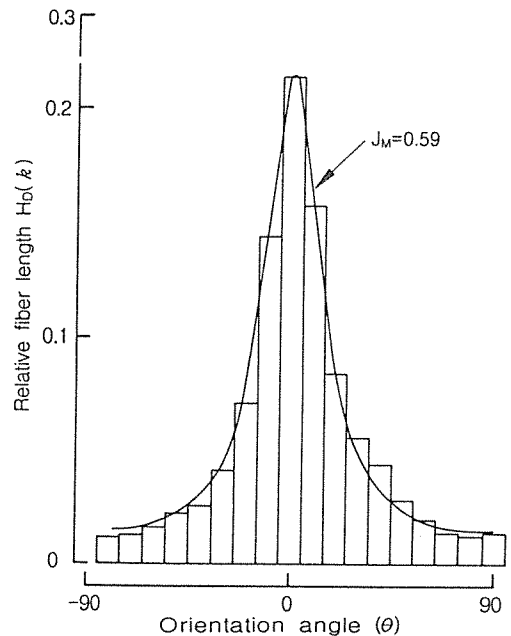
측정오차 때문이라 생각된다. 섬유의 겹침은 한 방향에 가까울 수록, 시험편에 차지하는 섬유량이 많을 수록 늘어난다.

본 연구의 결과로부터 화상처리를 이용한 농도법은 측정영역의 모든 화소에 대하여 측정하기 때문에 섬유 배향각 분포를 간단하게 측정할 수 있으며, 또 섬유를 미소부분으로 분할하므로 섬유형태가 곡선으로 놓여 있는 경우에도 적용할 수 있는 특징이 있다. 그러므로 이 방법은 장섬유강화 복합재료의 성형품을 연X-선 촬영하여 개개의 섬유를 식별할 수 없는 경우에도 화상처리하므로써 비파괴적으로 섬유 배향각 분포를 정확히 간이측정할 수 있어 유효하다고 생각된다.

그러나 농도법의 문제점으로는 농도차에 의해서 섬유 배향각을 측정하기 때문에 섬유의 교차점과



(a) Soft X-ray photograph of specimen

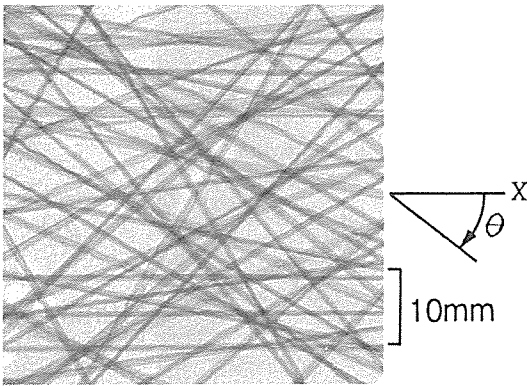


(b) Fiber orientation function J

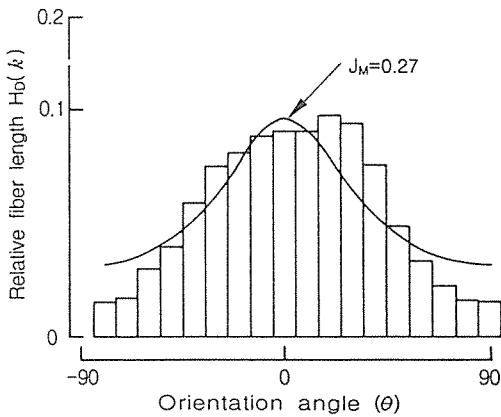
Fig. 12. Soft X-ray photograph and orientation function($J=0.76$, 5wt%, 4 strand)

겹치는 부분에서 배향각 측정이 부정확하게 나타나고 있다. 화상처리에 의해 교차점과 겹치는 지점을 추출하여 그 지점에서의 배향각을 결정하여 줄 수 있다면 측정된 J_M 값과 계산된 J값의 차이를 줄일 수 있다.

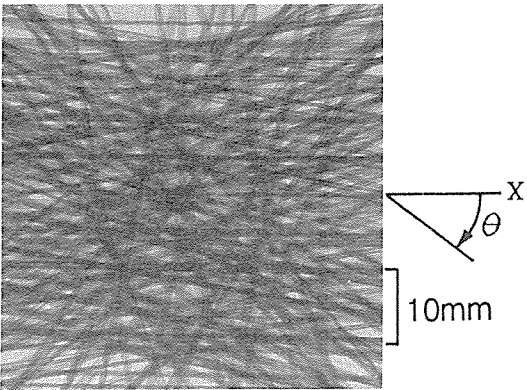
본 실험에서의 섬유함유율은 5wt%, 10wt%, 20wt%로 일반적인 복합판재에 비해 다소 낮은 값으로 생각되며 섬유함유율이 높은 복합판재의 경



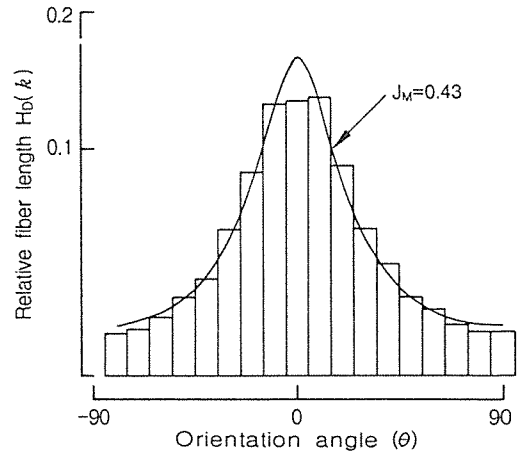
(a) Soft X-ray photograph of specimen



(b) Fiber orientation function J

Fig. 13. Soft X-ray photograph and orientation function($J=0.38$, 10wt%, 4 strand)

(a) Soft X-ray photograph of specimen

Fig. 14. Soft X-ray photograph and orientation function($J=0.5$, 20wt%, 4 strand)

(b) Fiber orientation function J

Fig. 14. Continued

우에서는 오차의 정도가 좀 더 커질것이라고 생각 된다. 또한, 복합판재를 제작할 때 적층수가 증가 하면 층간의 농도정보의 차이가 발생하리라고 생각되므로 앞으로 이점에 대해서 연구하면 보다 정확하고 적용범위가 넓은 측정이 가능하게 될 것이다.

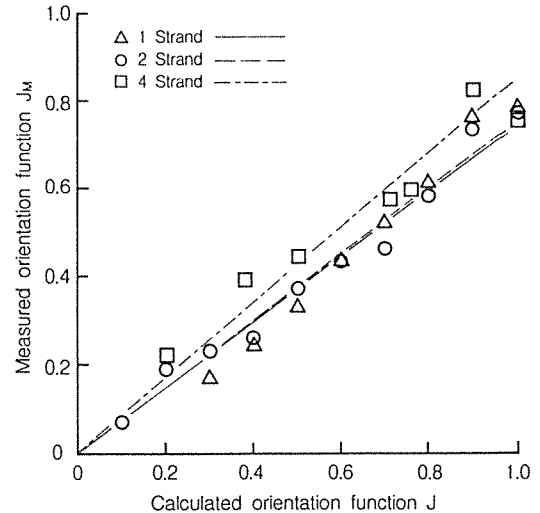


Fig. 15. Comparison between calculated orientation function and measured one for fiber content 5wt%

5. 결 론

섬유 배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀

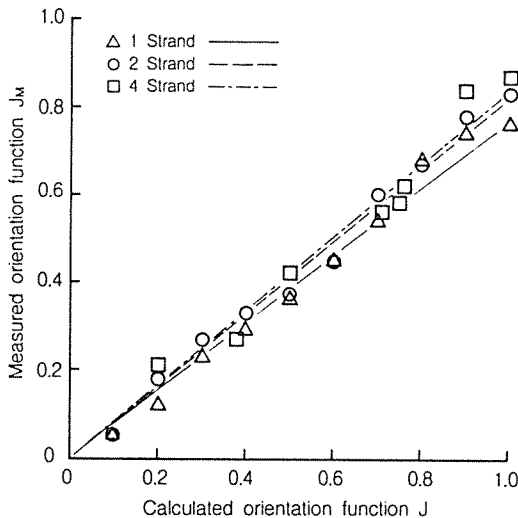


Fig. 16. Comparison between calculated orientation function and measured one for fiber content 10wt%

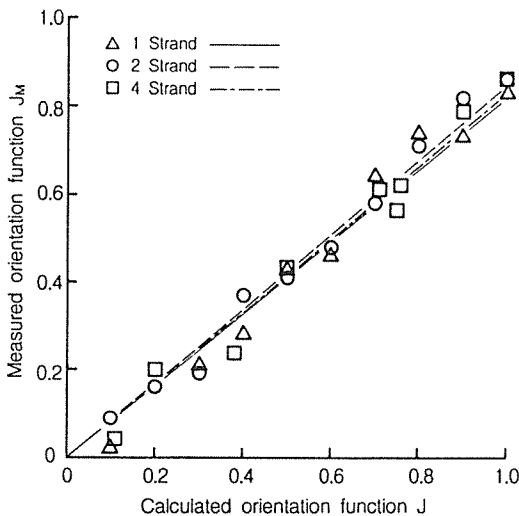


Fig. 17. Comparison between calculated orientation function and measured one for fiber content 20wt%

도에 대해 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 1스트랜드와 2스트랜드의 경우는 섬유함유율이 높을수록 측정된 섬유 배향함수 J_M 은 높게 측정되었으나, 4스트랜드의 경우는 섬유함유율이 높을수록 측정된 배향함수값이 낮게 나타났다. 이는 4스트랜드의 경우 섬유함유율이 높고 스트랜드의

수가 많기 때문에 섬유접침이 많아 측정된 섬유 배향함수 값이 낮게 나타남을 알 수 있다.

(2) 섬유길이가 1,000mm와 2,000mm인 경우의 측정된 섬유 배향함수 J_M 과 시뮬레이션 섬유 배향함수 J_S 와의 관계는 $J_M = 0.84J_S$ 이고, 섬유길이가 2,050mm, 4,100mm, 8,200mm인 경우의 측정된 섬유 배향함수 J_M 과 계산된 섬유 배향함수 J 와의 관계는 $J_M = 0.81J$ 라는 측정값을 얻었다. 이는 섬유길이가 길수록 섬유의 접침이 많아 측정된 섬유 배향함수 값이 낮게 나타남을 알 수 있다.

(3) 농도법은 측정영역의 농도차에 의해서 섬유 배향각 분포를 측정하기 때문에 섬유의 접침이 작은 시험편에서는 매우 유효하게 측정할 수 있으나, 섬유가 교차되는 부분에서는 정확한 방향을 측정할 수 없기 때문에 3차원적 측정법이 개발된다면 보다 정확한 섬유 배향각 분포의 측정이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터 연구비에 의해서 수행된 연구이며, 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hearle, J.W.S., Ozsalav, V., "45-Studies of Adhesive-Bonded Non-woven Fabrics. Part III : The Determination of Fibre Orientation and Curl", J. Text. Inst., No.11, 1979, pp.498.
2. Kallmes, O.J., Cloria, Bernier, "The Structure of Paper VIII. Structure of Idealized Nonrandom Networks", Tappi. Vol.47, No.11, 1964, pp.694-703.
3. 堀川明, 寺岡文雄, "FRP中の纖維配向角 評價法(第2報) ファウソホーフア 回折像による 配向角 評價の實際", 纖維機械學會誌, 33-7, 1980, pp.T74-77.
4. Menendez, H., White, J.L., "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, 1986, pp.1051-1055.

5. 卜部 啓, “複合材料の 非破壊検査-3. 電磁波”, 日本複合材料學會誌, 10-3, 1984, pp.107-110.

6. Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D.G., Kim, E.G., “Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image

Processing”, International Polymer Processing, Vol.X, Issue 3, 1995, pp.262-269.

7. 趙善衡, 李東起, 金 二坤, “長纖維強化 高分子複合板의 프레스成形에 있어서 畫像處理에 의한 纖維配向에 관한 研究”, 大韓機械學會論文集, 第15卷, 第3號, 1991, pp.834-842.

8. 山田國廣, 堀川 明, “2次元纖維集合體の確率幾何”, 纖維機械學會論文集, Vol.37, No.12, 1984, pp.51-64.
