

論文

영상처리를 이용한 복합재료 내의 단섬유 배향상태의 측정

김창근* · 고진* · 윤재륜*

Measurement of Short Fiber Orientation in Composite Materials using Image Processing

Chang Keun Kim*, Jin Ko* and Jae Ryoun Youn*

ABSTRACT

Purpose of this study was to develop a measurement system by which orientation, length, and number of fibers in composite materials can be investigated. Mixture of carbon fibers and polyester resin were pressed into a thin specimen. The digitized image was processed by such procedures as image enhancement, thresholding, noise cleaning, and thinning. From the acquired data cross-points of individual fibers were identified by utilizing proper masks and designated chain-code after end points were identified. At the cross point, the chain-code of separated fibers were obtained and compared to determine the most well-matched chain-code of the continuous fiber. From chain-code of all the fibers, length and orientation angle of individual fibers were calculated along with the number of fibers. In order to represent the state of fiber orientation of the specimen inspected, orientation tensor was calculated from the chain-code obtained. To include the influence of the fiber length on orientation tensor, a new orientation tensor reflecting the effect of fiber length was defined and determined for the specimen. The newly introduced orientation tensor was shown to be more proper for characterization of fiber orientation in a composite material which contains short fibers of different length.

초 록

본 연구에서는 단섬유 보강 복합재료 내의 섬유 배향상태, 섬유길이, 섬유의 갯수 등을 측정할 수 있는 영상처리 시스템을 구축하고, 배향텐서를 계산하였다. 탄소섬유와 폴리에스터 수지를 혼합하고 압축시켜 박판형태의 시편을 제작하였다. 시편의 영상데이터를 영상강화, 임계값 처리, 잡음 제거, 세선화 처리 등을 이용하여 처리한 후 섬유의 선단과 겹침 점을 적절히 마스크와 연결코드를 이용하여 인식하였다. 겹침 점에서 각각의 섬유에 대한 연결코드를 부여한 후 연속적인 한 섬유로서 볼 수 있는 연결코드를 결정하여 겹침 점에서의 각 섬유를 인식하도록 하였다. 모든 섬유의 연결코드를 각 화소에 대하여 결정한 후, 각 섬유의 길이, 갯수, 배향각 등을 계산하였다. 주어진 시편의 섬유

* 한국과학기술원 정밀공학과

배향상태를 효과적으로 표현하기 위하여 배향텐서를 선택하였으며, 각 섬유들의 길이가 배향텐서에 미치는 영향을 포함시키기 위하여 섬유 길이의 영향을 반영할 수 있는 배향텐서를 새로이 제안하였다. 섬유길이의 가중치를 갖는 배향텐서가 섬유의 배향상태를 더욱 적절히 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

최근 기계 및 각종 구조물의 소재는 경량화와 우수한 기계적 및 화학적 특성을 동시에 요구하기 때문에 섬유 강화 고분자 복합재료(FRP)의 응용이 급증하고 있다. 특히 단섬유 강화 고분자 복합재료(SFRP)는 고 비강도, 고 비강성, 고 인성과 우수한 내식성 등과 같은 일반적인 섬유 강화 복합재료의 장점과 더불어 대량생산과 복잡한 구조의 제작이 가능하므로 이에 대한 연구의 필요성이 크게 증대되고 있다. 섬유 강화 고분자 복합재료를 성형하는 경우의 문제점은 유동에 의해서 단섬유들이 배향을 이루어 이방성이 발생함에 따라 제품의 강도나 특성에 큰 영향을 미치는 것이다[1~3]. 또한 단섬유의 경우는 섬유의 세장비와 같은 개별 섬유의 형상도 제품의 물성에 영향을 미친다[4]. 따라서, 섬유 각각의 종합적인 배향상태를 특성화할 수 있는 측정법이 요구된다.

섬유 배향각분포에 관한 연구는 지금까지 주로 X선 회절 강도분포[5,6], Fraunhofer 회절상의 강도분포[7] 또는 전자파의 응용[1,8] 등을 이용하여 구한 간접적 측정법이 많이 행하여지고 있다. 김이곤 등은 복합재료의 섬유 배향각분포 측정에 있어서 단섬유의 배향은 교점계수법을 이용하여 측정하였으며 장섬유의 경우에는 Prewitt 오퍼레이터를 이용하여 영상처리 방법으로 측정하였다[2]. Gadala-Maria는 Fri-Chen 및 Sobel 오퍼레이터를 이용하여 접치지 않은 각 단섬유들의 윤곽선을 인식한 후 이 윤곽선에 관한 정보를 이용하여 개별 단섬유의 각도를 구하여 배향분포함수를 구하고 있다[3]. 일반적으로 단섬유의 경우에는 섬유를 개별인식하여 섬유 각각에 대한 각도를 구하고 장섬유의 경우에는 섬유들이 심하게 엮혀 있으므로 개별인식을 하지 않고 전체 영상에 대하여 픽셀 각각의 화소값의 기울기를 이용하여 유한차분 방법을 이용한 배향분포를 통계적으로 구하고 있다[2,11]. 단섬유의 경우는 특히 섬

유의 각도 이외에 섬유의 휘어진상태 및 길이 등도 중요한 인자가 되나 이에 대한 연구나 단섬유들이 겹쳐있는 경우에 관한 연구는 보고된 바가 적다.

본 연구에서는 CCD 카메라를 이용한 단섬유가 포함된 시편의 확대된 영상을 얻고 이를 영상처리법을 이용하여 처리한 후 각 섬유 영상마다 한쪽 선단을 인식한 후 다른쪽 끝단이 발견될 때까지 연결코드를 부여하고 이 코드를 분석하여 단섬유 각각의 배향각도, 갯수, 길이 및 겹쳐진 상태 등과 같은 개별 섬유의 종합적인 배향상태를 특성화하는 영상처리를 이용한 측정법을 제안하였다.

2. 섬유배향의 표현

섬유의 배향상태를 정량화 하기 위하여 물리량을 정의할 필요가 있는데, 본 연구에서는 배향텐서(orientation tensor:OT)를 적용하였으며, 섬유의 배향각도를 정의하기 위한 좌표축은 Fig.1에 나타내었다.

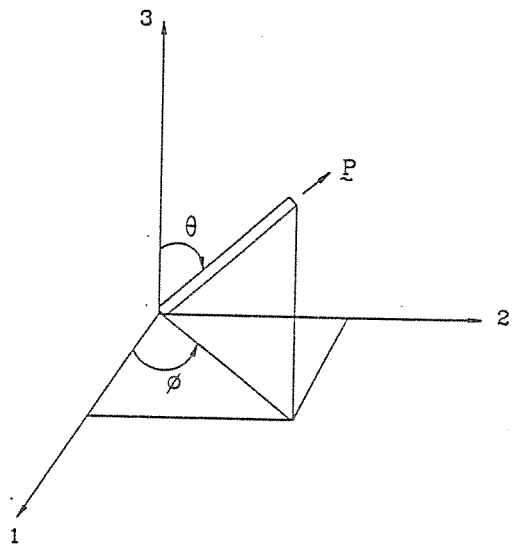


Fig. 1. Coordinate system defined for expression of fiber orientation.

2-1. 배향텐서

배향분포함수(orientation distribution function: ODF)의 단점인 복잡성을 보완하면서 일반적이고 간단 명료하여 섬유유 배향상태를 표현하기에 가장 우수한 변수가 배향텐서이다[9~12]. 배향텐서는 위치벡터 \vec{P} 와 ODF $\psi(\vec{P})$ 의 dyadic product를 모든 방향에 걸쳐 적분한 것으로 정의된다.

$$a_{ij} = \int P_i P_j \psi(\vec{P}) d\vec{P} \equiv \langle \vec{P} \vec{P} \rangle \dots\dots\dots (1)$$

또한 배향텐서는 다음과 같은 성질을 갖는다.

- 1) 대칭성 : $a_{ij} = a_{ji}$
- 2) 정규성 : $a_{ii} = 1$

이 때문에 성분이 감소하여 계산점이 많은 수치 해석에의 적용시 ODF에 비해 계산량이 수십분의 일로 감소하게 된다. 2차원 배향분포인 경우 다음과 같이 이산적(discrete)으로 표현할 수 있다.

$$a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_i^k P_j^k \dots\dots\dots (2)$$

N : 측정 대상인 섬유유의 총수

이 경우 a_{ij} 의 대각선 성분들은 섬유유들이 좌표축(coordinate axis) 방향으로 배향된 정도를 나타내고 나머지 성분들은 좌표축이 배향주축(principal axis of orientation)으로부터 편향된 정도를 나타낸다.

배향텐서를 (2)식에 의하여 계산할 경우 섬유유길이 배향상태의 평균값인 배향텐서에 미치는 영향을 효과적으로 나타낼 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 길이가 긴 섬유유가 배향에 미치는 영향을 크도록 가중치를 부여하여 아래와 같은 배향텐서의 계산식을 새로이 제안하였다.

$$a_{ij} = \frac{1}{(N+N')} \sum_{k=1}^N (L_r^k \times P_i^k P_j^k) \dots\dots\dots (3)$$

$$L_r^k = \frac{L^k}{L_{min}}$$

$$N' = \sum_{k=1}^N (L_r^k - 1)$$

단, L^k 는 k번째 섬유유의 길이를, L_{min} 은 측정된 섬유유의 최소길이를 의미한다.

3. 섬유 배향상태의 식별 알고리즘

통상 단섬유유의 길이는 2 내지 3mm 정도이고 직경은 약 10 μ m 정도이므로 이를 100배 정도 확대하면 직경이 대략 1mm 정도의 크기를 갖는 섬유유가 나타난다. 이와 같이 얻어진 영상을 임계값처리(thresholding), 잡음 제거(noise cleaning), 세선화 처리(thinning) 등의 영상처리법(image processing method)[13~15]을 이용하여 해석하기 용이한 영상으로 변경시킨 후에 개별 섬유유의 접점부분 및 양 끝단을 인식하여 연결코드(chain-code)로 연결시킨 후 이 코드를 분석하여 섬유유의 배향, 길이, 갯수 등의 배향상태를 판별하게 된다. 이를 위한 전체적인 알고리즘은 Fig.2와 같다.

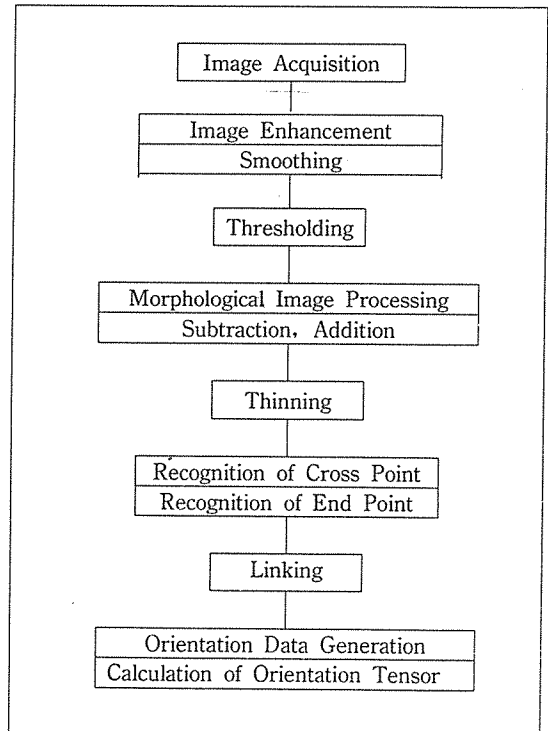


Fig.2. Procedure for characterization of fiber orientation.

3-1. 임계값 처리

임계값 처리란 여러 등급의 농도값을 갖는 영상을 임계값을 기준으로 0과 1 즉, 흑과 백 두가지의 농도값 만을 갖도록 각 화소당 1비트를 사용하여 농도를 표현하는 방법이다. 임계값의 결정은 주로 농도 히스토그램(histogram)을 사용한다. 일반적으로 단섬유 복합재료의 경우는 섬유 영상과 고분자 영상의 명암차가 분명하여 농도 히스토그램이 명확하게 구분되어 나타나므로 임계값의 설정이 용이하여 본 연구에서도 이 방법을 사용하여 임계값을 결정하였다.

3-2. 2값 잡음의 제거(binary noise cleaning)

1) 고립된 화소의 제거(isolated pixel removal)

고분자 내에는 섬유 이외의 각종 불순물이나 기포 등이 덩어리 형태의 영상으로 나타나므로 이들을 제거해야 한다. 예를 들어 고립된 3×3화소의 형태가 다음과 같이 나타나면

0	0	0
0	1	0
0	0	0

중앙의 화소는 불순물을 표시하므로 다음과 같은

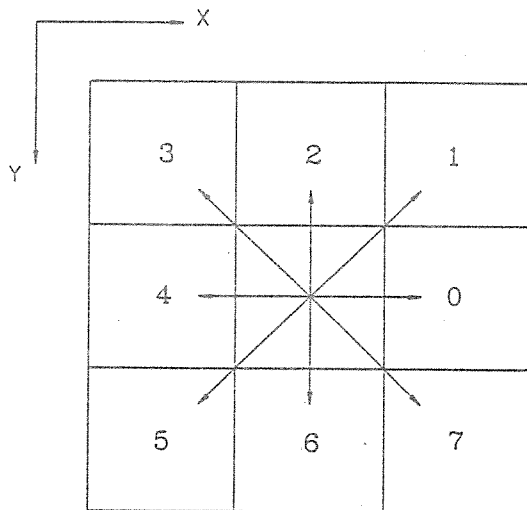


Fig. 3. Definition of chain-code direction.

논리식을 사용하여 제거시킨다.

$$F(i,j)=X \cap (X_0 \cup X_1 \cup \dots \cup X_7) \dots\dots (4)$$

여기서 F(i,j)는 i,j 위치에서 출력되는 화소값이며 X, X₀, X₁, ..., X₇의 픽셀 이웃관계는 Fig.3에 나타내었다.

2) 내부공간 채우기(interior full)

영상 자체 또는 2치화 과정 중의 오차 때문에 섬유 영상 영역에 공간이 생기거나 섬유가 끊어진 형태로 나타나는 경우가 발생한다. 이러한 오차를 보정하기 위해 각각 다음과 같은 논리식을 사용한다.

섬유 영상 내부에 폐공간이 생긴 경우 :

$$F(i,j)=X \cup (X_0 \cap X_1 \cap \dots \cap X_7) \dots\dots (5)$$

섬유가 끊어진 경우 :

$$F(i,j)=X \cup (X_0 \cap X_4)$$

$$F(i,j)=X \cup (X_1 \cap X_5) \dots\dots\dots (6)$$

$$F(i,j)=X \cup (X_2 \cap X_6)$$

$$F(i,j)=X \cup (X_3 \cap X_7)$$

3-3. 세선화 처리

세선화는 도형의 선을 중심선만 남도록 하여 단선으로 변환시키는 방법으로 마스크 방식과 삭제방식이 있다. 마스크 방식이란 삭제조건에 부합하는 형태의 마스크를 설정해 놓고 이 마스크와 비교하여 일치되는 영역중 중심 화소의 농도값을 0으로 변환시키는 작업을 반복 처리하는 방식인데[16] 도형의 연결도는 축소되어 특히 섬유 영상의 경우 섬유의 직경이 작아지는 부분에서 섬유가 단절된 형태로 나타나는 등 영상의 형상이 많이 왜곡되는 경향이 있어 본 연구에서는 삭제 방식을 사용하였는데 다음과 같은 순서로 이루어진다[17].

- 1) 윤곽선 추출
- 2) 윤곽선을 이루는 화소중 다중(multiple) 화소를 인식
- 3) 다중화소를 제외한 윤곽선 화소를 삭제
- 4) 윤곽선 추출이 안될 때까지 1), 2), 3)을 반복

3-3-1. 윤곽선 추출

2값 영상의 윤곽선을 구하는 가장 간단한 방법으로 2x2 마스크 방법을 이용하였으며[16] 출발점에서 시작하여 일주하게 되면 정지시킨 후 다시 새로운 출발점에서 반복한다.

3-3-2. 다중화소의 정의

위의 과정에서 추출된 윤곽선을 이루는 화소들 중 다중화소를 인식하여 구별해 내는데 다음의 정의 중 하나라도 해당되면 다중화소로 인식하게 된다[17].

- 1) 윤곽선 추적시 2번 이상 지나치게 되는 화소
- 2) 화소값이 1인 화소가 이웃하지 않는 화소
- 3) 윤곽선이 분리되는 곳의 화소와 4 연결도로 연결되어 있는 화소

3-4. 겹침점 처리

개별 섬유의 추적을 용이하게 하기 위해서 섬유가 겹쳐진 부분을 절단시켜 따로따로 섬유 추적을 한 후 절단된 각 섬유들의 연결코드로부터 얻어진 각도에 대한 정보를 이용하여 부합되는 것들을 원래 대로 하나의 섬유로 재인식하게 된다. 절단된 섬유가 하나의 섬유로 판단되면 각각의 연결코드들을 연결시켜 한개의 연결코드로 만들게 된다.

겹침 마스크는 Fig.4와 같이 중앙 화소 주위에 1이 아닌 화소가 3개 이상 존재하는 것으로 선정하였는데 이는 앞의 과정에서 2값 잡음의 제거와 세선화 처리가 이루어진 상태이므로 타당하다

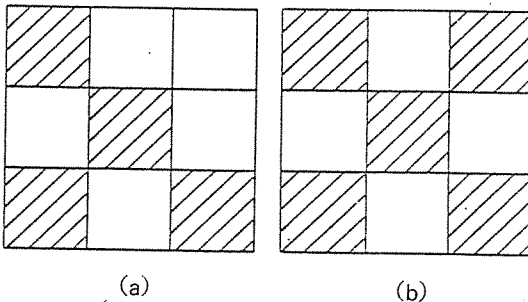


Fig. 4. Mask for identification of cross point..

3-5. 선단 발견

각 화소마다 3x3 마스크를 취하여 미리 설정해 놓은 3x3의 선단 마스크와 일치되는 화소를 섬유의 선단으로 인식한다. 선단 마스크는 Fig.5와 같다.

Fig.5 (a)에서 화소값이 0이 아닌 중앙 화소를 중심으로 주변 1,2,3,4,5, 화소 또는 3,4,5,6,7 등과 같이 마스크의 연결된 한쪽 모서리에 있는 화소들의 값이 0이면 중앙의 화소를 선단으로 인식한다.

0	0	0
0	1	
0		

Fig. 5. Mask for identification of end point.

3-6. 섬유 추적

섬유의 한쪽 선단을 발견하면 다른쪽 끝단까지 각 화소마다 연결코드를 부여하며 추적해 나간다. 코드 부여는 Fig.3을 기준으로 행한다. 연결코드를 추적하는 과정에서 섬유의 다른쪽 끝단을 발견하기 전에 겹침점에서 다른 섬유와 분리시킨 화소를 만나면 그때까지의 연결코드로부터 얻어진 각도와 그 화소에서 분리된 각각의 섬유를 추적하여 얻은 연결코드로부터 얻어진 각도를 비교하여 원래의 연결코드와 부합되는 연결코드를 결합하여 분리시킨 섬유를 연결시켜 주는 작업을 섬유의 끝단이 발견될 때까지 계속하게 된다.

3-7. 섬유의 인식 및 분석

1) 섬유의 배향

섬유의 배향을 구하기 위해서 각 코드마다 Fig.3에 나타난 x,y 좌표계에 따라 다음과 같은 좌표의 증분값을 할당한다.

- | | |
|--------------|--------------|
| 0 : dx | 4 : -dx |
| 1 : dx - dy | 5 : -dx + dy |
| 2 : -dy | 6 : dy |
| 3 : -dx - dy | 7 : dx + dy |

이때 각도 ϕ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \left(r \times \left(\frac{\sum dy}{\sum dx} \right) \right) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 Σ 는 연결된 모든 코드에 대하여 합산한 것이며 r은 화소의 종횡비를 수정하기 위한 계수이다.

2) 섬유의 길이

섬유의 길이를 구하기 위해서 코드 0,4에는 ds 값으로 4, 코드 2,6에는 3, 코드 1,3,5,7에는 5를 각각 할당한 후 모든 코드에 걸쳐 합산한 Σds 로서 상대적인 길이를 얻게 된다.

4. 실험 및 결과분석

4-1. 실험장치

본 연구에 쓰인 실험장치는 Fig.6에 도시하였다. 카메라의 한 화소 크기는 $17\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$ 이다. 비디오 모니터의 module은 512×512 , 가지 영역은 512×480 이며 픽셀 종횡비는 4×3 이다. 측정 대상물로는 폴리에스터 수지 속에 탄소섬유를 혼합하여 압축 응고시킨 시편을 제작하여 사용하였다. 탄소섬유는 직경 $10\mu\text{m}$, 길이 2mm 정도의 크기를 갖는 단섬유이다.

4-2. 측정값의 신뢰도 판정

획득된 영상을 Fig.2에 도시한 영상처리 알고리

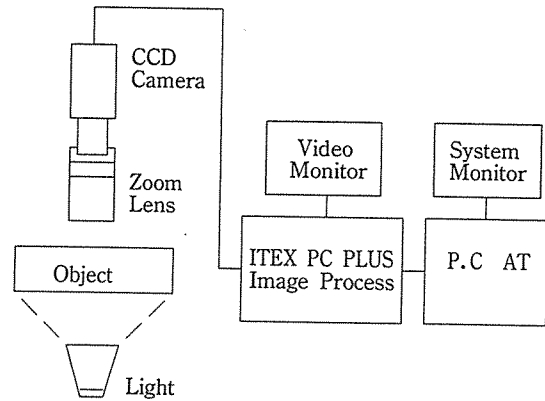


Fig.6. Schematic diagram of experimental set-up.

즘에 따라 처리하는 과정에서 원래의 영상이 변형됨에 따라 측정 오차가 발생하게 된다. 이러한 측정의 신뢰도를 판정하기 위해 배향텐서 값을 미리 알고 있는 영상에 대해 측정을 한 후 측정값과 실제값을 비교하였다. 비디오 화면의 픽셀 종횡비가 4×3 이므로 수정비 r을 $4/3$ 으로 하여 배향각을 계산하였으며 Fig.7 (b)의 경우를 예들들면 배향각이 36.87° 로 나타나지만 배향각 ϕ 를 구하면 45° 를 얻을 수 있도록 보정하였다. Fig.7 (a)와 Fig.7 (b) 형태의 그림을 Auto-cad를 이용하여 작도한 후 이 도면으로부터 CCD 카메라를 통하여 얻은 영상에 대하여 임계값 처리와 세션화 등을 행한 후 배향텐서를 계산한 결과 각각의 a_{ij} 값이 (a)의 경우는 다음과 같이 a_{11} 는 0.1%, a_{22} 는 2% 정도의 오차가 발생하였고

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0.9989 & -0.0227 \\ -0.0227 & 0.0011 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

(b)의 경우는 다음과 같이 a_{11} 는 7.4%, a_{22} 는 0.3%의 오차가 발생하였다.

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0.4630 & 0.4984 \\ 0.4984 & 0.5370 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

이상에서 보면 배향방향과 같은 방향 a_{ij} 값은 상당히 정확하고 그와 45° 방향의 a_{ij} 값의 오차가 비교적 큰 것으로 나타났다. 위의 도면 영상은 측정 대상물의 영상보다 이상적인 형태이므로 실제의 측정 오차는 이보다 커지겠지만 신뢰할 수 있는 정도임을 알 수

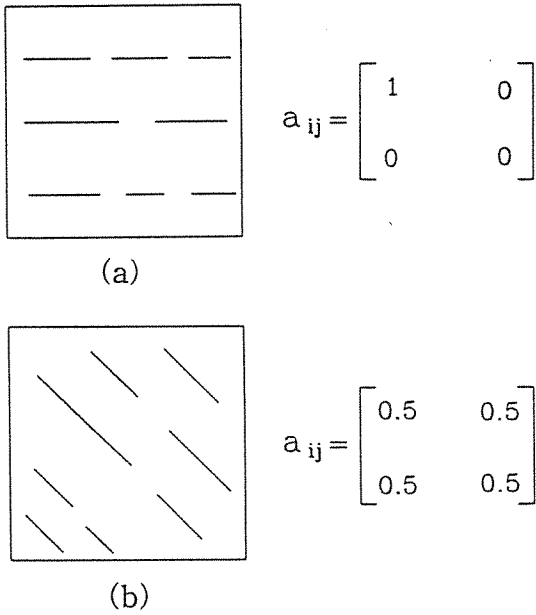


Fig. 7. Example of planar fiber orientation and corresponding orientation tensors.

있다.

4-3. 단섬유의 배향 측정

제작된 시편에 대하여 측정실험을 수행하였으며 Fig.8 (a)는 CCD 카메라로 부터 획득된 원 영상이고 이것을 임계값을 기준으로 2치화한 영상이 Fig.8 (b)이다. 세선화 처리를 행한 영상이 Fig.8 (c)이며 점침점처리와 2값잡음의 제거를 행한 영상이 Fig.8 (d)이다. 이 최종의 영상에 대하여 선단찾기와 연결코드의 추적을 각각의 모든 섬유에 대하여 수행하였다.

4-4. 측정결과 및 분석

각 섬유의 연결코드로부터 섬유 각각의 배향각도와 길이를 계산한 결과 Fig.9와 Fig.10에 나타내었다. 여기서 Fig.10의 상대길이 n은 가장 긴 섬유의 길이를 100으로 하였을 때 이에 대한 각 섬유의 길이를 말한다. 각 섬유의 배향각도로부터 (2)식을 이용하여 구한 배향텐서는 다음과 같다.

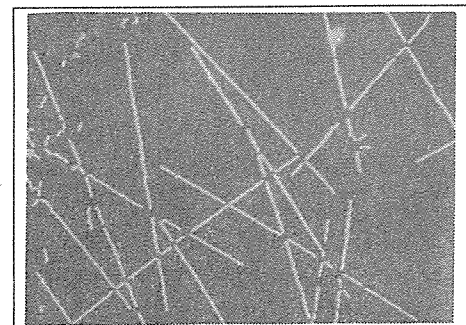
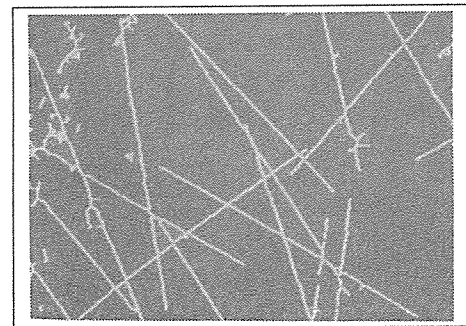
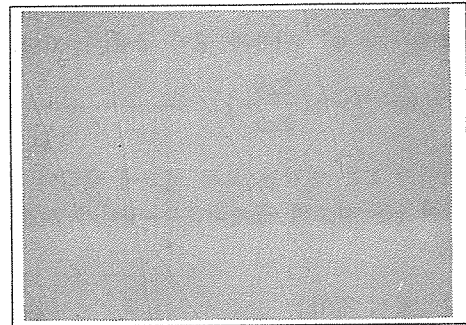
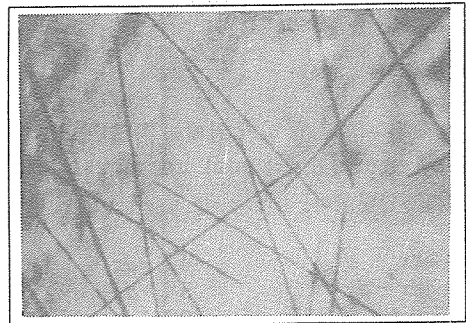


Fig. 8. Image processing results of the specimen.

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0.1218 & 0.0242 \\ 0.0242 & 0.8782 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

또한 섬유길이의 영향을 고려한 식(3)에 의하여 배향텐서를 구하면 다음과 같으며,

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0.1358 & 0.1192 \\ 0.1192 & 0.8642 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

이 배향텐서의 고유치 (eigenvalue)와 고유벡터 (eigenvector)를 구하면 아래와 같이 주어진다.

$$\lambda_1 = 0.8831, \quad \lambda_2 = 0.1169 \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 6.2693 \end{pmatrix}, \quad \phi_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.1586 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

이 결과는 섬유의 길이를 고려하지 않은 경우보다 섬유길이의 영향을 고려한 배향텐서가 실제 섬유의 배향상태를 더욱 잘 나타내고 있으며 배향상태를 고려하여 복합재료의 기계적 특성을 고려할 때 이러한 배향텐서가 더욱 유용하게 이용될 것으로 기대된다.

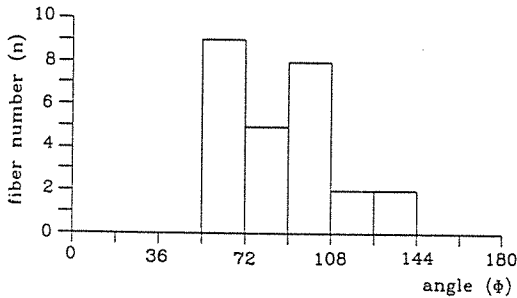


Fig. 9. Distribution of fiber orientation angle.

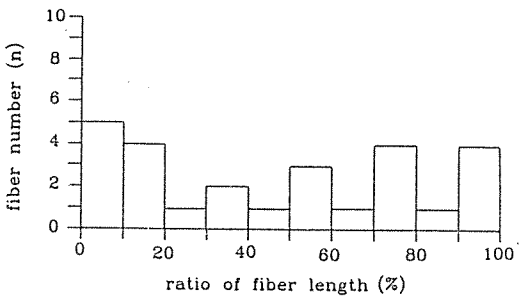


Fig. 10. Distribution of fiber length.

5. 결 론

이상으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 단섬유의 배향각도와 길이를 측정하여 배향텐서를 계산할 수 있는 영상처리 시스템을 구축하였으며 이에 필요한 프로그램을 개발하였다.
2. 섬유영상을 임계값 처리 및 세선화 처리를 함으로써 섬유의 인식에 필요한 최소한의 정보만을 포함한 영상을 이용하게 되므로 측정시 컴퓨터의 처리속도 향상과 기억용량의 효율적 활용이 가능하게 하였다.
3. 개별 섬유의 각도와 길이의 인식이 가능하게 되어 단섬유 복합재료의 측정에 적용시 섬유들이 겹쳐 있는 경우에도 세장비와 같은 각 섬유의 인자들을 섬유의 각도와 상관시켜 파악할 수 있게 되었다.
4. 본 연구에서 개발한 영상처리 기법에 의하여 섬유의 갯수를 구할 수 있으므로 섬유의 배향을 나타내는 가장 우수한 변수인 배향텐서를 계산할 수 있었으며, 특히 섬유의 길이를 고려할 수 있는 가중치를 배향텐서 값의 계산에 포함시킴으로써 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

인 용 문 헌

1. Kamal, M.R., Song, L., and Singh, P., "Measurement of Fiber and Matrix Orientations in Fiber Reinforced Composites," Polymer Composite, Vol.7, No.5, 1986, pp.323-329.
2. 이동기, 知仁, 김이곤, "영상처리에 의한 섬유 강화 고분자 복합판의 섬유 함유량 분포 측정", 대한기계학회논문집, 제 15권, 제 4호, 1991, pp.1177-1183.
3. Gadala-Maria, F. and Parsi, F., "Measurement of Orientation in Short-Fiber Composites using Digital Image Processing," Polymer Composite, to be published.
4. Thielges, H.P. and Michaele, W., "Effects on Fiber Length During Processing," ANTEC Technical Papers, 37, 1991, pp.1991-1993.

5. Prakash, R., "Fiber Volume Fraction Measurement in Composites by X-Ray Diffractometer," *Composites*, 1981, pp.193-194.
 6. Menendez, H. and 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.*, 24, 1984, pp.1051-1055.
 7. McGee, S.H. and McCullough, R.L., "Characterization of Fiber Orientation in Short-Fiber Composites," *J. Appl. Phys.* 55, 1984, pp.1394-1403.
 8. Thiery, M. and Sanschagrín, B., "A Study of Fiber Orientation and Microvoid Content in Long Fiber Reinforced Injection Molded Parts," ANTEC Technical Paper, 37, 1991, pp.319-325.
 9. Gopaldas, A.S., "Prediction of Fiber Orientation During Processing of Short Fiber Composites," Univ. of Illinois, 1987, pp.40-67.
 10. Advani, S.G. and Tucker III, C.L., "The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites," *J. of Rheology*, 31, 1987, pp.751-784.
 11. Fischer, G. and Eyerer, P., "Measuring Spatial Orientation of Short Fiber Reinforced Thermoplastics by Image Analysis," *Polymer Composite*, Vol.9, No.4, Aug. 1988, pp.297-304.
 12. 고진, 윤재륜, "고분자 복합재료의 유동성 형식 발행하는 단섬유의 배열," *유변학*, 제 3권, 제 5호, 1991, pp.102-116.
 13. Rosenfeld, A. and Kak, A.C., "Digital Picture Processing," Academic Press, London, 1976.
 14. Pratt, W.K., "Digital Image Processing," John Wiley & Sons, New York, 1991.
 15. Ballard, D.H. and Brown, C.M., "Computer Vision," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1982.
 16. Grant, G. and Reid, A.F., "An Efficient Algorithm for Boundary Tracing and Feature Extraction," *Computer Graphics and Image Proc.*, Vol.17, 1981, pp.225-237.
 17. Pavlidis, T., "A Thinning Algorithm for Discrete Binary Image," *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.13, 1980, pp.142-157.
-