나노 파이버웹의 온-라인 공정 정보 시스템

김주용, 임대영*, 변성원*
숭실대학교 섬유공학부, *한국생산기술연구원

An on-line process information system for nano-fiber webs

Jooyong Kim, Dae Young Lim*, Sungweon Byun*
Soongsil University, School of Textiles, Seoul, Korea,
**Korea Institute of Industrial Technology, Center of Industrial Textiles, Chon An, Korea*

1. 서론

전기방사에 의해 제조되는 나노 파이버웹은 섬유가 매우 가늘고, 기공이 미세하며 비표면적이 매우 커서 필터 및 전극재료에 적합한 산업용 소재이다. 나노 웹의 구조는 방사 용액의 농도, 방사 온도, 압력, 전압등 여러 변수들에 의해 영향을 받으며, 이 변수들의 구조에 미치는 영향들이 이론적, 실험적으로 많이 연구, 보고되어 있다 [1]. 그러나, 공정의 분석 및 제어에 대한 연구는 매우 드물며, 특히 대량 생산하에서의 품질 관리 시스템에 대한 연구는 전무한 실정이다. 본 연구는 파이롯트 스케일의 생산 시스템에서 제조되는 나노 웹의 구조(기공 결점)를 실시간 측정, 분석하여 공정의 상태를 모니터링하는 동시에 제품의 품질 상태를 실시간 분석하여 대량 고속 생산하의 나노웹 공정 및 품질의 최적 제어를 달성하는데 그 목적이 있다.

2. 모델 및 시스템 개발

2.1 시스템 구조

결점의 검출 및 분석을 위하여 비디오 현미경(video microscope)을 기반으로 한 영상 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 고배율 광학 현미경 (Nikon ME-500L®)에 dCCD 카메라(Toshiba IK-642F®)를 장착한 영상 검출부와 할라이드 광원및 집속 렌즈(Olympus®)로 구성된 광원부, 시료를 x,y축으로 정속 이송할 수 있는 이동 스테이지(Prior Scientific®), 초당 최고 30프레임을 수집할 수 있는 프레임 그래버(Flashbus MV Lite®)의 영상 수집부 그리고 실시간 영상 처리를 위한 DLL(dynamic linking library) 모듈과 영상 처리 및 그래픽 소프트웨어 (Matlab6.0®)로 구성되어 있으며, 최대 6대의 카메라가 연결되어 고속으로 실시간 영상 처리 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

2.2 모델

2.2.1 평균 이행 검출

본 연구에서는 연속으로 생산되는 나노 웹의 구조를 실시간 분석, 평가하는 시스템의 알고리듬으로 웹의 결점 빈도(rate of anomalies) 및 총 결점 면적 (total defective area)의 추이를 실시간으로 관찰한다. 각각 포아슨 누적합 관리도(P-CU)와 컴파운드 포아슨 분포를 정규 변환한 정규 누적합 관리도(C-SQ)를 사용하여 공정 평균의 변화 추이를 관찰하고, 공정 평균 이행을 검출하는 도구로 사용하였다. 이에 사용된 모델은 다음과 같다. (1)부터 (4)는 순서대로 포아슨 분포, 감마분포, 총 결점 면적의 확률 변수, 총 결점 면적의 분포인 컴파운드 포아슨 분포를 나타낸다.

$$P_k = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \qquad (1)$$

$$h_a = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\,\beta^{\alpha}}\, a^{\alpha-1}\, e^{\frac{-a}{\beta}} \qquad (2)$$

$$Z(R) = \sum_{i=1}^{N(R)} A_i \qquad (3)$$

$$f_Z(z) = \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{1}{\Gamma(n)\,\alpha\,\beta^{n\alpha}}\int_0^z t^{n\alpha-1}\, e^{\frac{-t}{\beta}}\, dt\right]$$

for $z > 0$ (4)

(4)식을 누적합 관리도에 적합한 정규 분포로 변환하기 위해 Box-Cox변환을 식 (5)에 의해 실행한다.

$$x^{(\omega)} = \frac{x^{\omega}-1}{\omega} \text{ if } \omega \neq 0 \quad = \log_e(x) \text{ if } \omega = 0 \qquad (5)$$

결점 빈도수를 위하여 식(1)에 근거한 포아슨 누적합 관리도(P-CU)를, 총 결점 면적은 식 (4)의 식(5) 변환에 근거한 정규 누적합 관리도 (C-SQ)를 구축하여 사용한다. 각 누적합 관리도의 판정 기준은 다음과 같다. C-SQ는 다음 두 식을 이용하여 S_i가 h (미리 설정된 공정평균 이행한계) 보다 크거나 R_i가 $-h$보다 작을 때 out-of-control 상태로 판정한다.

$$S_i = \max(0,\ S_{i-1} + X_i - k) \qquad (6)$$

$$R_i = \min(0,\ R_{i-1} + X_i + k) \qquad (7)$$

P-CU의 경우는 다음 두 식을 이용한다.

$$V_i = \max(0,\ V_{i-1} + X_i - k) \qquad (8)$$

$$W_i = \max(0,\ W_{i-1} - X_i + k) \qquad (9)$$

2.2.2 Scale dependency analysis

단순 일차 통계량(평균)에 의존하는 2.1.1의 단점을 보완하기 위한 방법으로서 측정 스케일 의존성을 밝히기 위한 분석 방법을 구축한다. 이 연구에서는 면적 평균들의 공간 의존성을 밝히는 방법으로 알란 분산(Allan Variance)을 이용한다. 나노웹의 결점치들의 분산은 국부적으로 변동하는 동시에 측정 스케일(처리 면적)에 의존한다. 측정 스케일을 연속적으로 변화시켜 가면서 결점 분산의 변화 패턴을 추적하므로써 임계 변동 면적을 찾아 낼 수 있으며, 웹의 미세 구조를 밝혀 낼 수 있다.

3. 실시간 수행 결과

다음 그림은 실시간 수집된 영상이다.

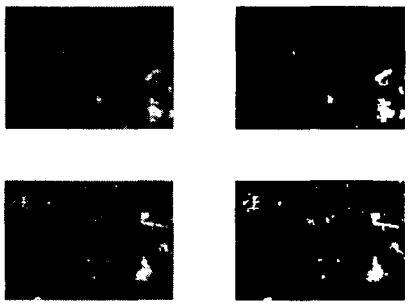

Figure 1. Comparison of four images captured in real-time of a Nylon6 nanoweb (upper left: original1, right: thresholded binary, lower left: original2, right: thresholded binary images)

기공 부분을 검출하기 위해 영상을 스레숄딩, 이진화한 후, 기공 개수와 면적을 실시간으로 계산 할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

PC기반의 비디오 현미경 영상 처리 시스템을 이용하여 생산되는 나노 파이버 웹의 결점 구조 및 품질을 실시간으로 분석할 수 있었다. 공정의 평균 이행정도 모니터링 및 웹 품질을 축약하여 나타내는 그림 2와 같은 품질 행렬(Quality Matrix)을 제공하여 실시간 공정 최적화 및 제어가 가능하게 되었다.

시간 / 기공크기	1	2	3	4	5
<20	30	20	46	26	53
<30	3	6	7	6	6
<40	0	4	1	4	7
<50	2	3	0	2	2
>50	22	14	19	8	17

Figure 2. A quality matrix

5. 참고문헌

1. M.M Demir, Electrospinning of poly- -urethane fibers, *polymer* **43**, P3303-3309 (2002).