

Roll Draft형 연조기의 Autolevelling에서 생산속도 변화에 따른 슬라이버의 동적 거동 모델링

권원식, 장승호, 허 유
경희대학교 섬유공학과

1. 서 론

섬유재료의 기계적 처리과정 중에서 나란히 배열된 섬유들의 집합체, 즉 '섬유속'에 꼬임이 가해지지 않은 상태에서 일정 장력을 가하여 단면적을 변화시키는 과정을 드래프트라고 한다. 실제 섬유 집속체의 선밀도 변화를 일으키는 드래프트 기구는 후속 공정처리에 적합하도록 섬유 속의 굵기를 바꾸어 줄뿐만 아니라 구성섬유의 배향도를 증진시킴으로써 재료 이용도를 증대시키고, 경우에 따라 여러 가닥의 섬유속을 평행 배열함으로써 확률적으로 균제도를 향상시키게 한다. 이러한 롤 드래프트 기구는 작동원리가 간단하고, 고속동작이 가능한 반면에 다음과 같은 부작용이 수반된다. 즉 1)구성섬유가 섬유장 분포, 공급 및 인출기구의 속도차 발생에 의한 동력학적 과도현상, 2)기계기구의 속도 변동, 개개섬유의 불균일한 거동 제어, 섬유흐름 및 롤 주위에서의 공기거동에 의해 불균제가 발생한다. 따라서 균일한 섬유속을 롤 드래프트기구에 통과시킨다 하더라도 출력되는 섬유속은 불균제를 갖게된다. 이는 근본적으로 드래프트기구는 불균제를 일으키는 기구임을 의미한다. 그러므로 연조공정의 경우, 연속되는 다음 공정에서는 섬유집합체의 균제도 개선이 일어날 수 없는 방적공정의 흐름에 따라 제품의 질을 개선시킬 수 있는 최종공정으로서의 섬유속 균제도 제어가 중요한 과제로 등장하게 되었다.

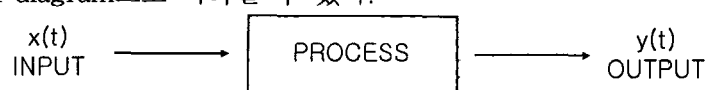
이러한 연조 슬라이버의 굵기를 자동제어하기 위하여는 불균제가 발생한 경우에 대하여 과도 상태에서의 제어시스템의 안정성과 반응시간(response time) 그리고 입상시간(rise time)이 대단히 중요하다. 이러한 크기는 제어기의 파라미터와 슬라이버의 동적 거동특성에 크게 영향을 받게된다. 또한, 슬라이버는 여러 가지 공정조건(생산속도, 연조비, 더블링 수)의 변동에 따라 서로 다른 거동을 나타내므로 슬라이버 굵기의 최적제어를 위하여는 슬라이버의 동적 거동특성을 해석하고 이를 모델화하는 것이 필요하다.^{(1)~(8)}

본 연구에서는 여러 공정조건 중에서 생산속도 변화에 따른 슬라이버의 동적 거동을 동정하였으며, 이 모델을 바탕으로 최적제어 파라미터값을 구하였다.

2. 슬라이버 거동의 동특성 모델링

2.1 이론적 배경^{(9)~(10)}

임의의 시각 t 에 어떤 공정의 입력을 $x(t)$, 출력을 $y(t)$ 라 하면, 이 공정의 동적거동은 다음과 같은 block diagram으로 나타낼 수 있다.



이러한 공정의 디지털 동특성 모델은 다음과 같은 차분방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$y_k + a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} + \dots + a_{m-1} y_{k-m+1} + a_m y_{k-m} = b_1 x_{k-d-1} + b_2 x_{k-d-2} + \dots + b_{m-1} x_{k-d-m+1} + b_m x_{k-d-m} \quad (1)$$

여기서, y_k : the value of $y(t)$ at the time $t = k \times T_0$
 x_k : the value of $x(t)$ at the time $t = k \times T_0$
 a_i, b_i : model parameters
 d : transportation time interval
 T_0 : sampling time interval
 m : the order of the process

이때 모델을 바탕으로 시각 t 이전에 측정된 값으로부터 현재 t 에서 예측할 수 있는 출력 y_{fk} 는

$$y_{fk} = -a_1 y_{k-1} - a_2 y_{k-2} - \dots - a_{m-1} y_{k-m+1} - a_m y_{k-m} + b_1 x_{k-d-1} + b_2 x_{k-d-2} + \dots + b_{m-1} x_{k-d-m+1} + b_m x_{k-d-m} \quad (2)$$

로 표시되므로 출력의 예측치 y_{fk} 와 실제 공정에서 측정된 공정출력 y_k 와의 차이, 즉 일반화된 에러(generalized error) e_k 를 $k = m+d, m+d+1, \dots, m+d+i$ 에 대하여 일반화하여 vector 형태로 나타내면 (3)식과 같이 표현된다

$$\begin{bmatrix} e_{m+d} \\ e_{m+d+1} \\ \vdots \\ e_{m+d+i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{m+d} \\ y_{m+d+1} \\ \vdots \\ y_{m+d+i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -y_{m+d-1} & -y_{m+d-2} & \dots & -y_{d+1} & -y_d & x_{m-1} & x_{m-2} & \dots & x_1 & x_0 \\ -y_{m+d} & -y_{m+d-1} & \dots & -y_{d+2} & -y_{d+1} & x_m & x_{m-1} & \dots & x_2 & x_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ -y_{m+d+i-1} & -y_{m+d+i-2} & \dots & -y_{d+i+2} & -y_{d+i+1} & x_{m+i-1} & x_{m+i-2} & \dots & x_{i+1} & x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\underline{e} \quad \underline{y} \quad \underline{\Psi} \quad \underline{\theta}$$

이때, 손실함수(loss function) L 을 $L = \underline{e}^T \underline{e}$ 로 정의하면 이를 최소화시키는 모델변수 $\underline{\theta}$ 는 least square법에 의하여 $\underline{\theta} = (\underline{\Psi}^T \underline{\Psi})^{-1} \underline{\Psi}^T \underline{y}$ 로 얻어진다.

그러나 이 모델 변수는 모델의 구조, 즉 모델차수 m 과 이동지연시간 d 가 주어질 때에 비로소 얻어질 수 있다. 본 연구에서는 least square법을 이용하여 이동지연시간 d 와 모델차수 m 을 다음과 같이 구하였다. 즉, 주어진 입력신호에 대하여 모델출력 y_{mk} 값과 실제 공정출력 y_{pk} 값을 비교하여 편차를 구하고 일정 시간동안 그 편차의 제곱합 S_e 를 구하였다.

$$S_e = \sum_k (y_m(k) - y_p(k))^2 \quad (4)$$

식(4)에서 S_e 를 최소화시키는 최소 m 값 및 d 값이 모델구조를 나타내는 변수로 지정된다.

3. 실험 장치의 구성^{(3)~(5)}

3.1 실험용 연조 장치

를 드래프트에서의 슬라이버 거동을 측정하기 위해서는 우선 실험대상이 되는 기본 연조

장치가 필요하다. 이를 위하여 실제 산업현장에서 사용되는 연조장치와 유사한 소형 모델 연조기를 제작하여 사용하였다. 3/3연조기로부터 1 delivery부분만을 분해, 개조하였다. 컴퓨터와의 정보교환에 의한 구동조정이 가능하고 각각의 드래프트 로울러축의 개별적인 속도변환이 용이하도록 기존의 로울러축의 각종치차 및 기어 등의 기계적 연결장치들을 제거하고 독립된 서보 모우터를 각각의 축에 설치하였다. 이 실험에서 이용된 연조장치의 각축과 코일러의 구동을 위해서 직류형 서보모우터를 이용하였으며, 캔의 구동에는 속도제어형 3상유도 모우터를 이용하였다. 각각의 모우터를 구동시키는 서보드라이버들은 D/A converter를 통하여 컴퓨터로부터 구동명령을 받는다.

3.2 슬라이버의 굵기 측정장치

연조장치에서 생산되는 슬라이버의 선밀도를 측정하기 위한 측정장치는 스트레인 게이지를 얇은 강판 스프링에 부착하여 기계식 측정장치를 제작하였다. 스프링은 출력슬라이버가 나오는 트럼펫 윗부분의 홈이 파여진 부분에 설치되었으며 일정량의 초기하중이 부과되었다. 설치된 스프링에서 발생하는 신호는 스트레인 게이지를 이용하여 감지한 후, 휘트스톤 브릿지를 통해 전기적 신호로 변환된다. 발생된 전기적 신호는 증폭기를 이용하여 증폭되고, A/D converter를 통하여 컴퓨터로 받아들여진다.

4. 실험

본 연구에서는 roll draft에서 가장 중요한 물리량이며 실제 공정에서 자주 나타나는 현상을 바탕으로 입력슬라이버의 절단과 연조비(draft ratio)의 변화에 따른 출력 슬라이버의 굵기변화를 동특성 모델의 대상으로 선정하였다.

섬유 원료로서는 실제 현장에서 사용되는 면 섬유 카드 슬라이버를 사용하였으며, 연조 실험 조건은 Table 1와 같다.

Table 1. Experimental conditions for the draft system

| | | | |
|---|-------------|----------|----------|
| Draft gauge | main draft | 44.5 mm | |
| | break draft | 47.0 mm | |
| Draft ratio | total draft | 6 | |
| | main draft | 4.62 | |
| | break draft | 1.3 | |
| Position of the sensor from the front nip point | | 110 mm | |
| Number of doubling | | 6 | |
| Delivery speed | 30 m/min | 40 m/min | 50 m/min |
| Sampling frequency | 300 Hz | 400 Hz | 500 Hz |

4.1 입력슬라이버의 절단

입력슬라이버의 굵기변화에 따른 출력 슬라이버의 굵기변동을 모델화하기 위하여 슬라이버를 한가닥 절단함으로써 입력신호를 스텝신호로 실현시키고 이에 따른 출력슬라이버의 굵기를 측정하여 보았다. Fig. 2은 이러한 실험의 측정결과이다.

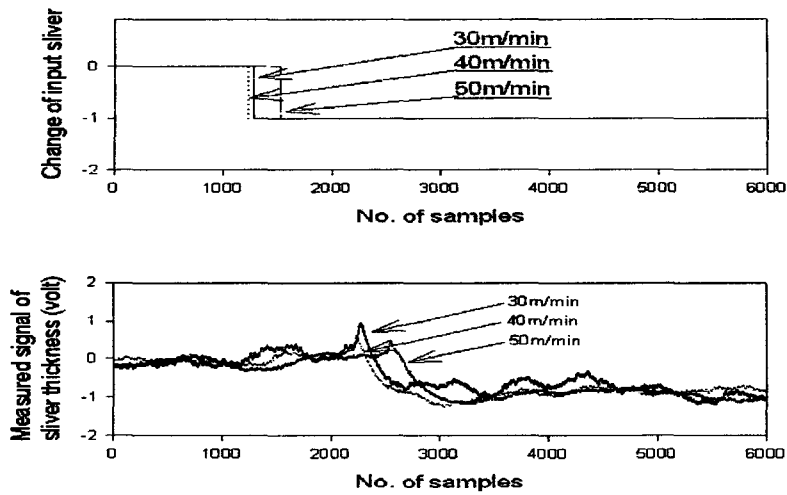


Fig. 2 The measured signal of the output sliver thickness by the step variation in input sliver

이에 의하면 입력슬라이버의 절단이 나타나는 경우, 해당부분의 출력슬라이버는 순간적인 굵기 증가가 나타난 후 공정진행에 따라 점차 가늘어지는 현상이 나타났다. 이는 섬유간의 미끄럼이 작아지므로써 순간적인 슬라이버 굵기의 증가가 나타나게 된다.

2절에서 서술한 방법에 의해서 구한 모델(delivery speed가 30m/min에서 50m/min으로 변화할 때)을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Digital model for different delivery speeds (input slivers cut)

| Delivery speed | Digital Models |
|----------------|--|
| 30 m/min | $y_k - 0.6313y_{k-1} - 0.2050y_{k-2} - 0.1019y_{k-3} - 0.1732y_{k-4} - 0.5775y_{k-5} + 0.2585y_{k-6} + 0.38y_{k-7}$ $+ 0.1704y_{k-8} - 0.1181y_{k-9} = 0.0118x_{k-1006} - 0.0077x_{k-1007} + 0.004x_{k-1008} - 0.0136x_{k-1009}$ $+ 0.03x_{k-1010} - 0.0161x_{k-1011} + 0.0014x_{k-1012} + 0.0004x_{k-1011} - 0.0085x_{k-1012}$ |
| 40 m/min | $y_k - 0.6871y_{k-1} - 0.1444y_{k-2} + 0.0385y_{k-3} - 0.054y_{k-4} - 0.2331y_{k-5} - 0.2182y_{k-6} - 0.0946y_{k-7}$ $- 0.144y_{k-8} + 0.5398y_{k-9} = -0.0016x_{k-1006} + 0.0096x_{k-1007} - 0.0058x_{k-1008} - 0.0098x_{k-1009}$ $+ 0.0224x_{k-1010} - 0.0038x_{k-1011} + 0.0067x_{k-1012} - 0.0293x_{k-1011} + 0.01435x_{k-1012}$ |
| 50 m/min | $y_k - 0.9023y_{k-1} - 0.1989y_{k-2} + 0.1587y_{k-3} + 0.2638y_{k-4} - 0.0269y_{k-5} - 0.1954y_{k-6} - 0.2942y_{k-7}$ $- 0.0955y_{k-8} + 0.2945y_{k-9} = -0.0241x_{k-1006} + 0.0183x_{k-1007} - 0.0135x_{k-1008} - 0.0016x_{k-1009}$ $+ 0.01014x_{k-1010} - 0.01x_{k-1011} - 0.0134x_{k-1012} + 0.0073x_{k-1011} - 0.0109x_{k-1012}$ |

4.2 연조비 변화

앞에서 제시한 실험조건 하에서 연조비를 스텝 변화시켜 total draft ratio를 6에서 5로 감소하는 경우와 6에서 7로 증가하는 경우의 모델을 동정하여 보았다. Fig. 3는 이때의 출력

슬라이버 굵기변화의 측정결과를 보여준다. 디지털 모델은 Table 3에 나타내었다.

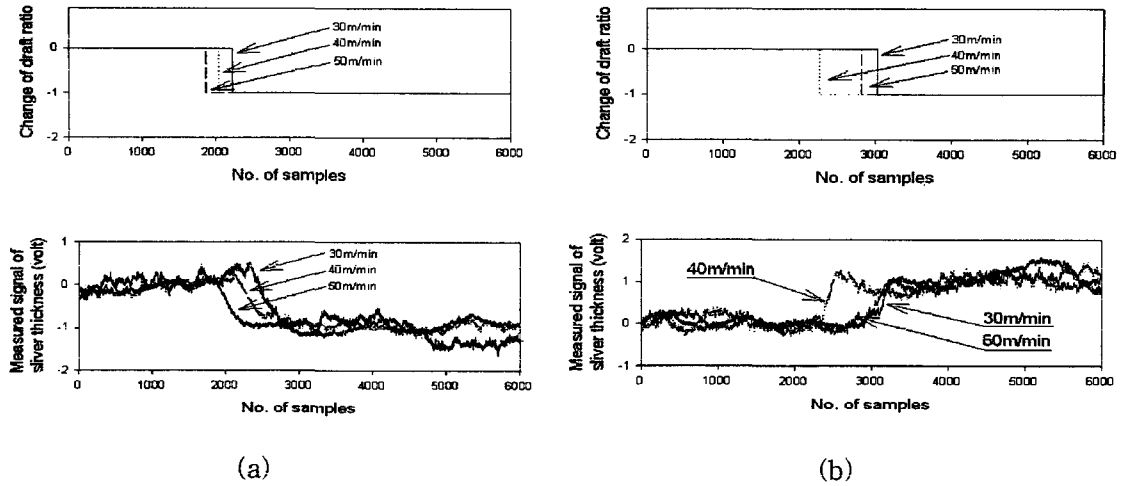


Fig. 3 The measured signal of the output sliver thickness by the step variation in draft ratio (a) draft ratio increased (b) draft ratio decreased

실험적결과에 의하면 드래프트비가 감소하는 경우, 출력슬라이버의 굵기변화는 느리게 일어나며, 반면에 드래프트비가 증가하는 경우에는 출력슬라이버 굵기 응답속도가 빠르다. 이는 슬라이버를 구성하는 섬유의 점탄성적 성질과 크립프, 그리고 드래프트 장력의 영향에 의하여 나타날 수 있다고 보여진다.

Table 3. Mathematical model for different delivery speeds (draft ratio changed)

| Delivery speed | Mathematical Models (increased) | Mathematical Models (decreased) |
|----------------|---|---|
| 30m/min | $y_k - 0.377y_{k-1} - 0.179y_{k-2} - 0.135y_{k-3} - 0.304y_{k-4}$ $= -0.028x_{k-94} + 0.052x_{k-95} - 0.013x_{k-96} - 0.005x_{k-97}$ | $y_k - 0.465y_{k-1} - 0.199y_{k-2} - 0.118y_{k-3} - 0.207y_{k-4}$ $= -0.040x_{k-94} + 0.055x_{k-95} - 0.001x_{k-96} - 0.024x_{k-97}$ |
| 40m/min | $y_k - 0.392y_{k-1} - 0.221y_{k-2} - 0.151y_{k-3} - 0.227y_{k-4}$ $= -0.057x_{k-94} + 0.111x_{k-95} - 0.010x_{k-96} - 0.034x_{k-97}$ | $y_k - 0.422y_{k-1} - 0.212y_{k-2} - 0.143y_{k-3} - 0.208y_{k-4}$ $= -0.029x_{k-94} + 0.047x_{k-95} - 0.019x_{k-96} - 0.016x_{k-97}$ |
| 50m/min | $y_k - 1.432y_{k-1} + 0.331y_{k-2} + 0.632y_{k-3} - 0.525y_{k-4}$ $= -0.013x_{k-94} + 0.014x_{k-95} + 0.003x_{k-96} + 0.002x_{k-97}$ | $y_k - 1.42y_{k-1} + 0.351y_{k-2} + 0.539y_{k-3} - 0.465y_{k-4}$ $= -0.006x_{k-94} + 0.033x_{k-95} - 0.066x_{k-96} + 0.034x_{k-97}$ |

4.3 최적 제어 파라미터의 선정⁽¹¹⁾

본 시뮬레이션에서는 비례적분제어기(PI-controller)를 사용하여 식(5)를 얻었다.

$$u_n = K_c \left(e_n + \frac{1}{T_I} \sum_{j=0}^n e_j \right), \quad e_n = T_{ref} - T_n \quad (5)$$

여기서, T_{ref} : reference
 T_n : the measured value at the time $t = n \times T_0$
 T_0 : sampling period

(5)식은 Ziegler-Nichols법에 의하여 식(6)으로 최적화 되었다. 식(6)에서 얻어진 K_u (ultimate gain)와 P_u (ultimate period)를 이용하여 시스템의 제어 파라미터인 K_c 와 P_u 를

구하였다.

$$K_c = 0.45K_u, \quad T = \frac{T_1}{T_0}, \quad T_I = \frac{P_u}{1.2} \quad (6)$$

Table 4에 식(6)에 의하여 연산된 제어파라미터 값을 나타내었다.

Table 4. Control parameters of each models

| Parameters | K_c | P_u |
|----------------|-------|-------|
| Delivery speed | | |
| 30m/min | 1.71 | 326 |
| 40m/min | 1.305 | 311 |
| 50m/min | 0.45 | 142 |

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 연조기의 생산속도 변화(30m/min, 40m/min 50m/min)에 따른 섬유거동을 모델링하였다.
- (2) 구해진 수학적 모델에을 바탕으로 생산속도 변화에 따른 각각의 최적 제어변수값을 구하였다.

6. 참고 문헌

- (1) P. Grosberg, P. A. Smith, K. Yoshikawa, "A Cause of Irregularity in roller drafting". J. Text. Inst., 53, T533 (1962)
- (2) B. Dutta, P. Grosberg, "A Practical Limitation To Feedback Control of Roller Drafting Systems", J. Text. Inst., 64, 541 (1973).
- (3) H. Balasubramanian, P. Grosberg, and Y. Turkes, "Studies in Modern Yarn Producton", Annual Conference of the Textile Institute, (1968)
- (4) G. S. Jeong and Y. Huh, "A Study on the Application of Individual Motor Drive System on the Roll Drawing Frame", J. Korean Fiber Soc., 28, 65 (1991).
- (5) B. D. Choi, Y. Huh, "A Study on the Digital Control of Sliver Irregularity by the Individual Motor Drive System (I)", J. Korean Fiber Soc., 31, 551 (1994).
- (6) Y. Huh, J. L. Woo, "Identification of the Dynamic Behavior of Sliver by the Roller Drafting (I)", J. Korean Fiber Soc., 30, 527 (1993).
- (7) B. D. Choi, Y. Huh, "Identification of the Dynamic Behavior of Sliver by the Roller Drafting (II)", J. Korean Fiber Soc., 31, 300 (1995).
- (8) P. Grosberg, P. A. Smith, K. Yoshikawa, "A Cause of Irregularity in Roller Drafting", J. Text. Inst., 53, T533 (1962)
- (9) R. Isermann, "Identifikation Dynamischer Systeme I". p. 202, Springer Verlag, 1992.
- (10) T. Soederstroem and P. Stoica, "System Identification", p. 146, Prentice-Hall, 1989.
- (11) J. Van De Vegte, "Feedback control System" Pretice-Hall, London, p. 141, 1990.