

로울러 드래프트 공정의 퍼지제어 시뮬레이션

한성수

영남대학교 섬유학부

1. 서 론

드래프트는 두 로울러 사이를 통과하는 섬유속의 입력속도와 출력 속도를 조절함으로써 섬유속의 선밀도를 조절하는 공정이다.[1,2] 로울러 드래프팅에 대한 이론적 또는 실험적인 수많은 연구가 진행되었다.[3-5] 이때 균제도의 증가를 위하여 더블링이 이용되는데, 이때 이용되는 대표적 장치가 오토레블러(autoleveller)이다.

PID 피드백 제어는 시스템의 환경변화나 노후로 인한 파라미터의 변화에 적용하여 제어할 수 없을 뿐 아니라 시스템이 선형으로 근사화 되는 것에 대한 극히 제한된 제어이다. 슬라이버의 거동과 로울러드래프팅에 대한 실제의 비선형.시변특성을 고려할 때 기존의 PID 피드백 제어 방식으로는 만족할만한 결과를 얻기가 힘들다. [6-9]

본 논문에서는 개별구동방식에 의한 연조 작업시 불균제도를 최소화 하기 위하여 적용코자하는 적합한 퍼지제어구조를 도출하기 위하여 슬라이버 로울러 드래프팅 과정을 이산 모형화 하고, 퍼지제어한 결과를 시뮬레이션하였다.

2. 이 론

2.1 슬라이버 거동의 이산 모형화

드래프트 조작부에 공급되는 슬라이버의 선밀도 $x(t)$ 가 X 로 일정하다면 백 로울러 표면 속도 $v_b(t)$ 와 프론트 로울러 표면속도 $v_f(t)$ 를 V_b , V_f 로 일정하게 유지하여 드래프트 조작부에서 출력되는 슬라이버의 선밀도 $y(t)$ 를 Y 로 일정하게 할 수 있으며 이때 X 와 Y 의 관계는 식 2.1과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = \frac{V_b}{V_f} X, \quad V_f > V_b \quad (2.1)$$

또한, 드래프트 조작에 의해 변화된 슬라이버의 선밀도를 Δx 라고 한다면 식 2.2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = X - Y = \left(1 - \frac{V_b}{V_f}\right) X \quad (2.2)$$

그리고 슬라이버의 위치에 따라서 선밀도의 변화율이 다르게 나타나는데 이러한 선밀도 변화율을 $D_r(t)$ 이라 하고 이를 시간 t 에 대하여 나타낸 것을 $D_r(t)$ 라 하면, 식 2.5 식 2.6과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(l) = 1 - \int_0^l \phi(t) dt \quad (2.3)$$

$$D_s(l) = XB(l) + Y[1 - B(l)]$$

$$= (X - Y)B(l) + Y \quad (2.4)$$

$$D_r(l) = \frac{dB(l)}{dl} = -\phi(l) < 0 \quad (2.5)$$

$$D_r(t) = \frac{dB(t)}{dt} = -\phi(t) < 0 \quad (2.6)$$

여기서,

$\phi(l), \phi(t)$: 변속점 분포함수

$B(l), B(t)$: 저속섬유의 분포함수

$D_s(l)$: 선밀도 분포함수

여기서 l 은 백 로울러에서부터의 거리이며 식 2.5와 식 2.6의 l 과 t 는 식 2.7의 관계를 만족하여야 한다. 즉, t 는 백 로울러로부터 입력된 슬라이버가 거리 l 의 위치에 왔을 때의 시간이다.

$$XV_b \cdot t = \int_0^l D_s(l) dl \quad (2.7)$$

그리고 변속점 분포함수 $\phi(l)$ 는 식 2.8을 만족한다.

$$\int_0^{L_{bf}} \phi(l) dl = 1 \quad (2.8)$$

여기서 L_{bf} 는 백 로울러와 프론트 로울러 사이의 거리(m)를 나타낸다. 또한 $D_r(t)$ 는 식 2.9를 만족하게 된다.

$$\int_0^T D_r(t) dt = -1 \quad (2.9)$$

여기서 T 는 X, V_b, V_f, L_{bf} 의 함수가 되는데, 이는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$T = \frac{(X+Y)L_{bf}}{2V_b X} = \frac{(X+Y)L_{bf}}{2V_f Y} \quad (2.10)$$

한편, 선밀도의 변화율을 고려하여 드래프트 구간 내의 임의 위치 l 에서의 선밀도 변화분을 구하면 식 2.11과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x(l) = X - D_s(l)$$

$$= -X \int_0^l D_r(s) ds + X \frac{V_b}{V_f} \int_0^l D_r(s) ds \quad (2.11)$$

이 식 2.11을 시간 t 에 대해서 나타내면 2.12와 같이 된다.

$$\Delta x(t) = X \int_0^t D_r(\tau) d\tau + X \frac{V_b}{V_f} \int_0^t D_r(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

따라서 식 2.2는 식 2.13과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\Delta x &= X - Y \\ &= X + X \frac{V_b}{V_f} \int_0^T D_r(\tau) d\tau\end{aligned}\tag{2.13}$$

그러나 실제 드래프트 조작에서 입력 슬라이버의 선밀도 $x(t)$ 는 시간에 따라 변하는 값을 가지므로 이에 따라 로울러의 표면속도 $v_b(t)$, $v_f(t)$ 를 적절히 변화시켜야 출력 슬라이버의 선밀도 $y(t)$ 를 원하는 값 $Y_{desired}$ 로 큰 오차 없이 유지할 수 있다. 그리고 실제로는 슬라이버가 백 로울러에 입력되는 시각 t 에서의 로울러들의 표면속도에 의해서만 출력 슬라이버의 선밀도가 결정지어지는 것이 아니라 그 시각 t 에서부터 슬라이버가 프론트 로울러를 통해서 출력되는 시각 $t+T$ 까지 시간 T 동안의 로울러들의 표면속도에 의해서 출력 슬라이버의 선밀도가 결정된다. 이러한 요소들을 고려한다면 식 2.13은 식 2.14와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta x(t+T) &= x(t) - y(t+T) \\ &= -x(t) \int_t^{t+T} \frac{v_f(t+\tau) - v_b(t+\tau)}{v_f(t+\tau)} D_r(\tau) d\tau\end{aligned}\tag{2.14}$$

여기서 T 는 앞에서와 마찬가지로 식 2.15과 같이 근사화 할 수 있다.

$$T = \frac{(X_0 + Y_{desired})L_{bf}}{2V_{b0}X_0} = \frac{(X_0 + Y_{desired})L_{bf}}{2V_{f0}Y_{desired}}\tag{2.15}$$

여기서,

X_0 : 입력 선밀도의 평균값 (g/m)

V_{b0} : 백 로울러 표면속도의 평균값 (m/s)

V_{f0} : 프론트 로울러 표면속도의 평균값 (m/s)

따라서 식 2.2에서 Y 는 식 2.16과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}y(t+T) &= x(t) - \Delta x(t+T) \\ &= x(t) \left(1 + \int_0^T \frac{v_f(t+\tau) - v_b(t+\tau)}{v_f(t+\tau)} D_r(\tau) d\tau \right)\end{aligned}\tag{2.16}$$

이 식에서 샘플링 주기 T_s 가 충분히 작으면 이 식은 식 2.17과 같이 이산시간에 대하여 나타낼 수 있다.

$$y(k+n) = x(k) \left(1 + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{v_f(k+i) - v_b(k+i)}{v_f(k+i)} D_r(i) T_s \right)\tag{2.17}$$

여기서 n 은 식 2.18과 같이 나타난다.

$$n = \frac{T}{T_s}\tag{2.18}$$

2.2 제어기의 설계

슬라이더 선밀도 제어를 위해서 그림 1과 같은 이산시간 제어 시스템을 제안한다.

그림 1의 슬라이더 선밀도 제어 시스템은 로울러의 적절한 표면속도를 계산하기 위한 부제어기(sub-controllers)와 로울러의 표면속도가 부퍼지제어기에서의 출력을 추적하게 하기 위한 주제어기(main controller)로 구성되어 있다. 부제어기 1은 P제어기로, 부제어기 2와 주제어기는 그림 1과 같은 구조를 갖는 퍼지제어기로 구성하였다.

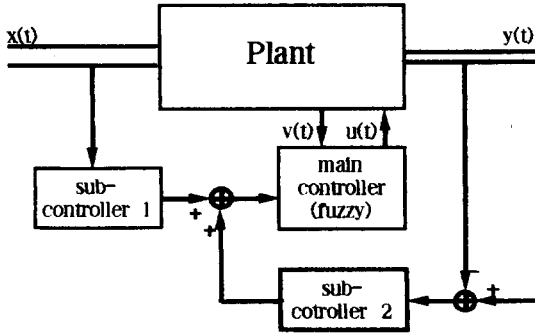


Fig.1. Discrete control system with fuzzy controller

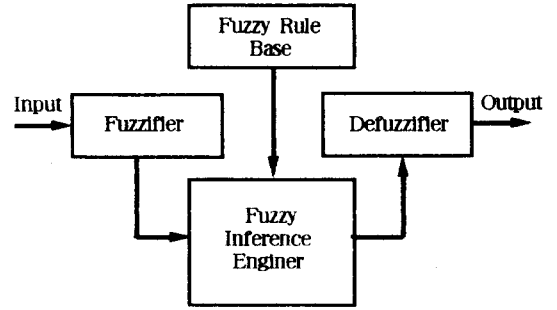


Fig.2. Basic configuration of fuzzy logic system

본 논문에서 적용한 주제어기와 부제어기 2의 멤버쉽함수는 입력범위를 정규화한 멤버쉽함수(Regulated membership function)를 이용하였으며, 오차 변화량은 모두 표1의 정규화된 멤버쉽함수를 이용하였다. 또 오차와 오차변화량에 대한 멤버쉽함수를 동일하게 사용하였다. 또한 퍼지제어 규칙(Fuzzy control rules)은 표1과 같이 63개의 제어규칙을 사용하였다.

Table 1 Fuzzy control rules

Y		X ₂						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
X ₁	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
	ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB

N : Negative P : Positive ZR : Zero B : Big M : Medium S : Small

본 논문에서 사용한 추론방식은 최소연산규칙(Minimum operation rule)을 이용하며, 추론의 결과로부터 얻어진 퍼지 집합은 면적중심법(center of area method)을 이용하여 비퍼지화하였다. 비퍼지화된 값은 -1에서 1사이의 값으로 나타나며, 다시 출력 스케일 요소에 의해

적정한 범위로 변환되어 플랜트에 가해진다.

2.2.1 부제어기 1

부제어기 1은 드래프트 조작부에 공급되는 입력 슬라이버의 선밀도 $x(t)$ 를 측정하여 프론트 로울러의 표면속도 기준값을 결정하여 주제어기에 입력된다. 슬라이버 선밀도 $x(t)$ 를 kT_s 마다 샘플링한 값을 $x(k)$ 라고 하면, k 번째 제어기의 출력값 $u_r(k)$ 는 드래프트 조작부에 입력된 슬라이버 선밀도의 평균값을 기준으로 식 2.20과 같이 구하여 진다.

$$x_r(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(k-i) \quad (2.19)$$

$$u_r(k) = \frac{V_b}{Y_{desired}} x_r(k-m+\beta) \quad (2.20)$$

여기서 m 은 선밀도 검출부에서 검출된 슬라이버가 백 로울러에 입력될 때까지의 지연 시간 T_m 을 의미한다. 그리고 β 는 시스템의 물리적 지연시간을 나타낸 것이다.

2.2.2 부제어기 2

부제어기 2는 퍼지제어기를 사용한다. 드래프트 조작부에서 출력되는 출력 슬라이버의 선밀도 $y(t)$ 를 측정하여 원하는 기준값과의 오차 x_{s1} 과 오차의 변화분 x_{s2} 를 제어기의 입력으로 하여 주제어기에 공급될 값 u_s 를 구한다.

$$x_{s1}(k) = K_{s1} \left(Y_{desired} - \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s} y(k-i) \right) \quad (2.21)$$

$$x_{s2}(k) = K_{s2} (x_{s1}(k) - x_{s1}(k-1)) \quad (2.22)$$

$$u_s(k) = u_s(k-1) + K_{s3} \text{fuzzy}(x_{s1}(k), x_{s2}(k)) \quad (2.23)$$

2.2.3 주제어기

주제어기는 백 로울러와 프론트 로울러의 표면 속도를 제어하기 위한 퍼지제어기이다. 여기서는 프론트 로울러의 표면속도를 V_f 로 일정하게 유지하고 백 로울러의 표면속도 $v_b(k)$ 를 제어함으로써 슬라이버 선밀도를 제어하고자 한다. 부제어기 1과 2에서 구한 u_r 과 u_s 를 합한 값과 로울러의 속도와의 오차 x_{m1} 과 오차의 변화분 x_{m2} 를 제어기의 입력으로 하여 식 2.27과 같이 백 로울러에 공급할 전압 u_m 을 결정한다.

$$r(k) = u_r(k) + u_s(k) \quad (2.24)$$

$$x_{m1} = K_{m1} (r(k) - v_f(k)) \quad (2.25)$$

$$x_{m2} = K_{m2} (x_{m1}(k) - x_{m1}(k-1)) \quad (2.26)$$

$$u_m = \frac{r(k) + K_{m3} \text{fuzzy}(x_{m1}, x_{m2})}{g} \quad (2.27)$$

3. 퍼지 시뮬레이션 결과

본 사례 연구에서는 백 로울러와 프론트 로울러의 반지름은 1cm, 로울러 사이의 간격은 5cm로 가정하였다. 그리고 변속점 분포함수는 정규분포함수를 $\phi(l) = (1 + \sin(2\pi l - \pi/2))$, $0 \leq l \leq 1$ 로 근사화 하였다.

그림 3은 불규칙 슬라이버 입력에 대한 백모터의 구동 특성을 보여주며 그림 4는 불규칙 입력슬라이버와 제어응답에 대한 출력슬라이버의 변화상태를 보여준다. 제어의 특성은 프론트 모터와 백 모터 사이의 거리에 어느 정도 의존하나 대개 사용되는 평균 거리를 5cm로 볼때 입력슬라이버의 매우 불규칙 변동에 대한 제어 응답특성은 상당히 좋음을 알수 있다.

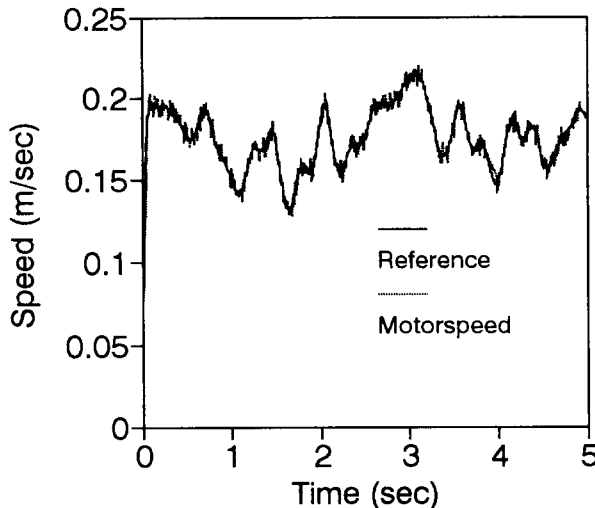


Fig.3. Speed for Back Motor

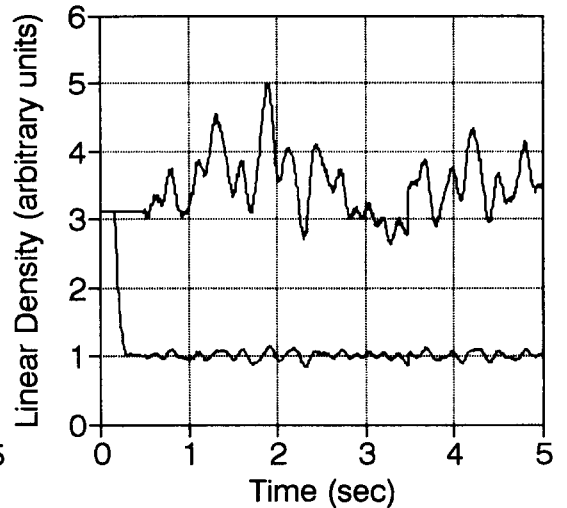


Fig.4. Characteristic of Sliver Response

이 시스템을 PID제어로 구성시 거리변동에 조금의 유격이 발생하거나, 슬라이버의 약간의 미끄러짐등에 의하여 출력은 완전히 달라지며 적응성이 좋지 않게 된다. 그리고 만약에 입력이 더욱더 큰 외란을 포함할 경우에는, PID제어기는 제어 성능을 상실하게된다. 그러나 퍼지제어기는 본 시뮬레이션에서 본 바와 같이 우수한 제어 특성을 보여줌을 알수있다.

4. 참고 문헌

1. 이재곤외 3인, 방적공학, 동명사, 1994.
2. 이재곤, 섬유공정해석, 서울대학교 출판부, 1994.
3. H. R. Plonsker and S. Backer, Text. Res. J., 37, 637(1967).
4. I. Dogu, Text. Res. J., 41, 534(1971).
5. J. S. Crahan, C. K. Bragg, Text. Res. J., 42, 175(1972).
6. Astrom and Wittenmark, Automatica, 13, 475(1977).
7. M. Vukobratovic, 'Non-adaptive and adaptive control of manipulation robot', New York, Springer, 1985.
8. 이시천, 이교일, 한국자동제어학술회의논문집, 1183(1993).
9. S. Y. Chun and B. H. Seo, Proceedings of TENCON.93, 361(1993).