

# 횡방향 변위가 발생하는 웹의 퍼지 제어 Fuzzy control of the lateral displacement of a moving web

\*안재범<sup>1</sup>, 호탐탄<sup>2</sup>, 신현훈<sup>3</sup>, 이상윤<sup>4</sup>

\*Jaebum An<sup>1</sup>, Thanh Tam Ho<sup>2</sup>, Hyeunhun Shin<sup>3</sup>, Sangyoon Lee(slee@konkuk.ac.kr)<sup>4</sup>  
<sup>1-3</sup> 건국대학교 기계설계학과, <sup>4</sup> 건국대학교 기계공학부

Key words : lateral displacement, moving web, fuzzy control

## 1. 서론

웹(web)은 폭에 비해 두께가 얇고 길이가 매우 긴 소재로, 일반적으로 풀림롤(unwinder)로부터 풀려나와 비구동롤러(idle roller), 이송롤러(driven roller)를 지나 감김롤(winder)까지 연속적으로 이송되며 가공된다. 이때 롤러의 정렬불량, 롤형상, 소재의 형상 및 기계진동 등에 의해 웹은 횡방향으로 운동하게 되고, 이는 최종적으로 제품의 품질 및 감김롤의 형상 등에 영향을 준다. 웹의 횡방향 변위를 제어하기 위한 장치로 가이드 시스템이 사용되는데, 웹이나 공정 특성에 따라 감김롤이나 풀림롤 근처, 또는 롤러 사이에 설치된다. 웹의 횡방향 변위에 대한 연구는 Shelton의 수학적 모델<sup>1</sup>을 바탕으로 이루어지고 있으며, 최근에는 시스템 규명(system identification), 앞먹임제어(feedforward control)를 이용한 제어 방법<sup>2,3</sup>들이 제시되었다.

이 논문에서는 횡방향 변위 제어를 위해 웹의 위치 오차와 오차증감 속도를 고려한 퍼지제어(fuzzy control) 기법과 시뮬레이션 결과를 소개한다.

## 2. 가이드 시스템의 수학적 모델

본 연구에 사용한 변위형 웹 가이드 시스템(displacement-type guide system)은 Fig. 1과 같다. 이는 두 개의 평행한 롤러를 동일한 중심점을 기준으로 회전시켜 응답속도를 증가시킨 가이드이다. 이 형태의 가이드에 대해 Shelton이 제안한 웹의 횡방향 거동에 관한 수학적 모델은 1차 모델과 2차 모델로 구분되는데, 1차 모델은 웹의 횡방향 탄성거동에 의한 곡률을 무시한 모델이다.

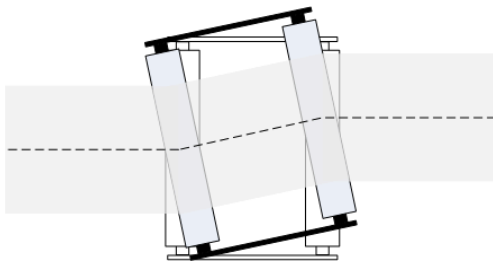


Fig. 1 Displacement-type guide system

### 2.1 1차 모델

Fig. 2와 같은 시스템에서 입력  $z$ 가 세 번째 롤러의 횡방향 변위일 때,  $x_L$ 에서 웹의 변위  $Y_L$ 을 전달함수로 나타내면 식 (1)과 같다.

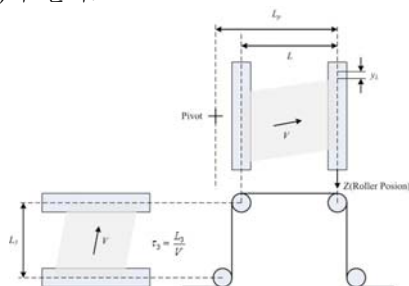


Fig. 2 Schematic of displacement-type guide system

$$\frac{Y_L(s)}{Z(s)} = \frac{\tau_3^2(L/L_p)s^2 + (1 + (L/L_p)\tau_3s + (L/L_p))}{\tau_3^2(L/L_p)s^2 + (1 + (L/L_p)\tau_3s + 1)}, \tau_3 = L_3/V \quad (1)$$

### 2.2 2차 모델

2차 모델은 소재의 횡방향 거동에 대한 단성변형을 고려한 것으로, Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 롤러를 지나는 웹에 대해 식 (2)와 같은 전달함수로 표현된다.

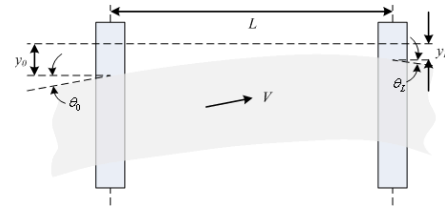


Fig. 3 Boundary conditions

$$Y_N(s) = \frac{-\frac{f_3}{\tau_N} s + \frac{f_1}{\tau_N^2}}{s^2 + \frac{f_2}{\tau_N} s + \frac{f_1}{\tau_N^2}} Y_{N-1}(s) + \frac{s^2 + \frac{f_2}{\tau_N} s + \frac{f_2 + f_3}{\tau_N^2}}{s^2 + \frac{f_2}{\tau_N} s + \frac{f_1}{\tau_N^2}} Z(s) \quad (2)$$

$$f_1(KL) = \frac{(KL)^2 \{ \cosh(KL) - 1 \}}{KL \sinh(KL) - 2 \cosh(KL) + 2}$$

$$f_2(KL) = \frac{KL \{ KL \cosh(KL) - \sinh(KL) \}}{KL \sinh(KL) - 2 \cosh(KL) + 2}$$

$$f_3(KL) = \frac{KL \{ \sinh(KL) - KL \}}{KL \sinh(KL) - 2 \cosh(KL) + 2}$$

여기서,  $\tau = L/V$  이고  $K = \sqrt{T/EI}$  로  $T$ 는 장력,  $E$ 는 웹의 탄성계수,  $I$ 는 단면에 대한 관성모멘트이다.

## 3. 횡방향 변위의 퍼지제어

웹을 이송하는 공정 중에 발생하는 횡방향 변위를 제어하기 위해 퍼지제어를 적용하였다. 수학적 모델과 실제 실험 결과가 대체로 일치하므로<sup>2</sup>, 이 모델을 바탕으로 MATLAB과 Working Model 2D 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4와 같이 MATLAB에서 퍼지제어를 설계하고, 연산된 결과를 Working Model 2D의 가이드 모델에 입력값으로 주어 횡방향 변위를 측정하였다.

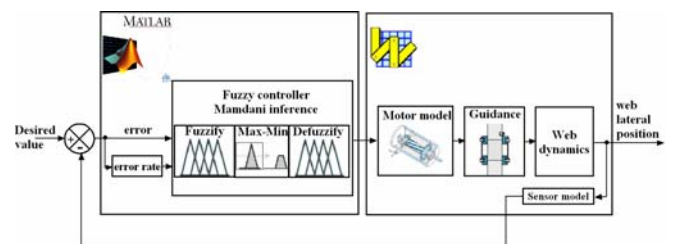


Fig. 4 Fuzzy control by MATLAB and Working Model software

### 3.1 퍼지제어기

Working Model 의 가이드 모델로부터 횡방향 위치 오차와 오차증감 속도를 측정하여 MATLAB 의 제어기에 입력된다. 각각의 계산은 식 (3)과 같다.

$$e(t) = y_d(t) - y_r(t)$$

$$e\_rate = e(t) - e(t - 1)$$
(3)

여기서  $y_d$  는 원하는 웹의 위치이고,  $y_r$  는 실제 웹의 위치이다. MATLAB 의 제어기는 입력값을 이용하여 퍼지규칙에 따라 모터모델을 위한 제어신호를 출력한다.

### 3.2 멤버십 함수와 If-then 규칙

입력값을 위한 멤버십 함수는 위치 오차와 오차증감 속도이다. Fig. 5 와 같이 두 변수 모두 다섯 개의 집합으로 구분되고 위치 오차의 경우 가우스 분포 함수, 오차증감 속도는 삼각함수 형태이다. 그리고 출력값을 위한 변수는 가이드의 위치이고, 멤버십 함수는 Fig. 6 과 같다.

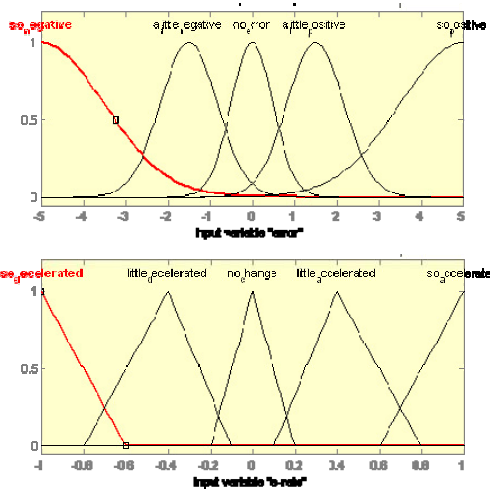


Fig. 5 Membership functions of a lateral error(above) and a lateral error rate(below)

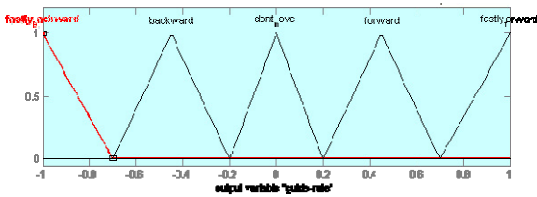


Fig. 6 Membership functions for the output

가이드의 빠른 응답과 진동을 방지하기 위해 13 가지의 if-then 규칙을 만들었다. 언어 형태로 표현된 각 규칙들이 제어규칙 집합을 이루고 각 규칙들 사이에는 'also'의 관계를 가진다. 규칙들은 Table 1 과 같다.

### 3.4 시뮬레이션 결과

퍼지제어의 성능을 측정하기 위해 사인(sine)과 스텝(step) 신호를 입력하여 가이드의 거동을 시뮬레이션 하였다. 입력값은 원하는 웹의 위치이고, 결과는 시뮬레이션을 통한 웹의 위치이다. 입력된 사인신호는 주기가 1 초이고 그 크기는 ±10mm 이고, 스텝입력은 주기는 2 초, 크기는 10mm 이다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 7 과 같다. 원하는 웹의 위치와 시뮬레이션을 통한 위치 사이의 오차는 사인입력의 경우 최대 0.5mm 가 발생하였고, 스텝입력의 경우 신호가 증감할 때 좀 더 큰 오차가 발생하였다.

Table 1 If-then rules

If (error is no_error ) then (guide_rate is dont_move).
If (error is a_little_negative) and (e_rate is little_decelerated) then (guide_rate is forward).
If (error is a_little_negative) and (e_rate is so_decelerated) then (guide_rate is forward).
If (error is a_little_negative) and (e_rate is no_change) then (guide_rate is forward).
If (error is a_little_negative) and (e_rate is little_accelerated) then (guide_rate is fastly_forward).
If (error is a_little_negative) and (e_rate is so_accelerated) then (guide_rate is fastly_forward).
If (error is so_negative) then (guide_rate is fastly_forward).
If (error is a_little_positive) and (e_rate is so_decelerated) then (guide_rate is backward).
If (error is a_little_positive) and (e_rate is little_decelerated) then (guide_rate is backward).
If (error is a_little_positive) and (e_rate is no_change) then (guide_rate is backward).
If (error is a_little_positive) and (e_rate is little_accelerated) then (guide_rate is fastly_backward).
If (error is a_little_positive) and (e_rate is so_accelerated) then (guide_rate is fastly_backward).
If (error is so_positive) then (guide_rate is fastly_backward).

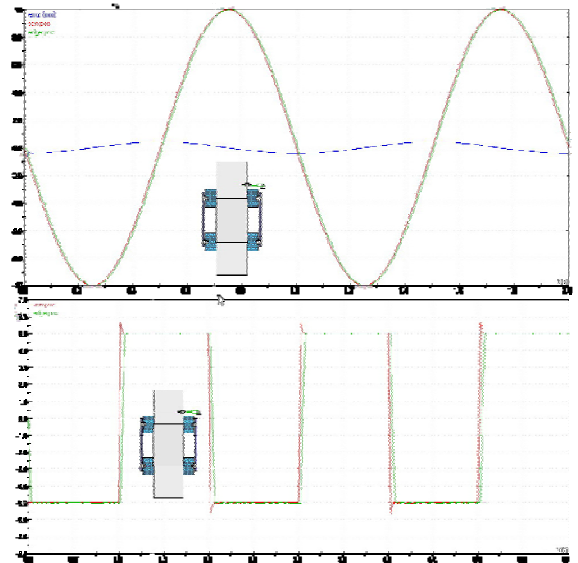


Fig. 7 Simulation results for sine(above) and step(below) input

## 4. 결론

웹의 횡방향 변위를 제어하기 위해 퍼지제어를 적용하여 시뮬레이션 하였다. MATLAB 을 이용하여 퍼지제어를 설계하고 Working Model 을 통해 2 차원 형태의 가이드를 모델링하였다. 시뮬레이션 결과 퍼지제어를 통해 횡방향 변위를 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 퍼지제어의 경우 입력값과 결과값 사이의 대응관계를 정의하는 것이 편리하고, 제어규칙이 언어적 표현을 바탕으로 하기 때문에 이를 이해하고 수정하는 것이 용이하다. 따라서 실제 현장에서 퍼지제어가 사용될 경우 제어와 유연성에 있어 장점을 가질 것이라 기대한다. 차후에는 현재 제작중인 시뮬레이터를 이용하여 실제 실험을 통한 퍼지제어의 검증과 보완이 이루어질 예정이다.

## 후기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Shelton J. J., "Lateral Dynamics of a moving web," Ph. D Thesis, Oklahoma State University, 1968.
- 권순오, 김상훈, 신기현, "System Identification 기법을 이용한 이송중인 웹의 사행 거동에 대한 모델링," 한국정밀공학회 2002년도 추계학술대회는논문집, 624-627, 2002.
- 권순오, 신기현, "전향보상기법을 이용한 가이드 시스템에서의 사행 제어," 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄 강연 및 논문집, 693-697, 2002.