

비선형 웹 이송 시스템의 장력제어

윤석찬*, 백승훈**, 정진태***, 한창수***

Tension Control in a Nonlinear Web Transfer System

Seok-Chan Yun*, Seung-Hun Paek**, Jin-Tai Chung*** and Chang-Soo Han***

Abstract

This paper presents the study of the tension control in a web transfer system. In this study the sliding mode controller is applied to a time-varying nonlinear mathematical model. The model was derived to consider the effects of changing the roll radius in tension variation during winding and unwinding. The uncertainty in modeling may be due to unmodelled dynamics, on variations in system model. Designed sliding mode controller made the system error always staying in the suggested surface from the beginning. Through this, system is maintained to be robust against a disturbance and uncertainty. To verify the designed controller has a good performance, various inputs such as desired velocity, step input, and trapezoidal input are applied. When the sliding mode controller was used, the system(the tension control) performance was improved comparing to the PID controller. The robustness of the controller with respect to an estimation error was verified through simulations.

Key Words : Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 제어기), Tension Control(장력 제어), Thin Film(얇은 필름), Unwinder(풀림롤), Winder(감김롤)

기호설명

h :web의 두께 b :web의 감쇠계수
 w :web의 폭 J_{web} :web의 관성모멘트
 ρ :web의 밀도 J_{Roll} :roller의 관성모멘트
 k :web의 탄성계수 R_u, R_w :(un)winded roll의 반경

θ_2, θ_1 :(un)winded roll의 회전각
 K_{m1}, K_{m2} :각 모터의 모터상수
 J_{m1}, J_{m2} :각 모터의 관성 모멘트
 B_1, B_2 :각 롤러의 감쇠계수
 I_1, I_2 :각 모터에 공급되는 전류
 R_{iu}, R_{iw} :(un)winded roll의 초기 반경

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
 ** 한양대학교 대학원 기계공학과
 *** 한양대학교 기계공학과

1. 서론

일반적으로 필름(film) 또는 웹(web)이란, 연속적이며 매우 길고, 구부러지기 쉬운 박판(thin plate, membrane) 형태의 재료를 총괄하여 지칭하는 것이다. 박판 이송시스템은 연속적이고 매우 길며, 구부러지기 쉬운 얇은 필름 재료를 초기의 풀림롤(unwinder)로부터 감김롤(winder)로 이송하는 장치로써 필름 이송장치, 인쇄기의 종이 이송장치, 반도체 공정의 웹 이송장치 등의 광범위한 분야에서 사용되는 시스템이다. 이러한 박판 이송장치가 적용되는 공정에서는 소재의 이상 변형과 파손을 방지하고, 정밀한 위치 이송이 공통적으로 해결되어야 한다. 그러나 이 장치는 풀림롤과 감김롤의 반경이 변하는 비선형 시스템이며 따라서 모델구성 및 제어기 설계에 많은 어려움을 겪고 있다.

지금까지 장력 제어의 문제를 해결하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 기존의 연구에서 장력을 제어하기 위한 방법으로는 마찰판을 이동시켜 마찰 토크로 장력을 제어하는 방식, 댄서롤(dancer roll)의 위치를 변화시켜 이송되는 웹의 장력을 제어하는 방식, 루퍼암(looper arm)의 각도를 변화시켜 장력을 제어하는 방식, 전기 유동 유체를 장력제어에 이용하는 방식, 그리고 본 논문처럼 두 개의 모터를 동기(synchronous) 운전하여 그 속도차를 장력제어에 이용하는 방식이 있다.

얇은 필름의 장력을 제어하기 위해서 Stangroom은 1990에 ERF(Electro Rheological Fluid)를 이용한 클러치를 제작하여 시스템의 스펀 장력 제어에 관한 기본적인 연구를 수행하였다. Yokoyama등은 1993년에 선형 모터로 마찰판을 이동시키고 마찰 토크로 테이프의 장력을 제어하는 방식을 고안하였으며, Stoten은 1993년에 minimal control synthesis 알고리즘을 자기 테이프(magnetic tape)에서의 장력제어에 적용하였다.⁽¹⁾ 또한 Yeung등은 1995년에 퍼지제어(fuzzy control)를 이용하여 가는 선(wire) 재료를 고속으로 감을 때의 장력제어에 관한 연구를 수행하였고⁽⁴⁾, Shin은 1996년에 연속 공정 시스템의 종방향 운동에 관한 모델링 및 가변 이득(variable-gain) PID 제어에 관하여 연구하였다.⁽⁵⁻⁶⁾ 그러나 이러한 기존의 연구들은 대부분 선형이론에 근거한 제어기들로서 성능 및 강인성 면에서 부족한 점들이 있었다.

본 논문에서는 박판 이송시스템에서 이송 박판의 장력 변동과 이송속도를 제어하여 일정 장력을 유지하고 제한한 이송 시스템이 일정한 이송속도를 가지고 동작하도록 하는 슬라이딩 모드 제어기의 설계를 최종 목표로 하고

있다.

또한, 축 방향 이송속도를 갖는 박판에 대해 기존의 연구에서 고려하지 못했던 이송속도의 시간 변화와 롤의 반경변화에 따른 기하학적 비선형성을 고려한 연구를 수행할 것이다.

2. 시스템 모델

필름 이송 시스템은 웹의 장력을 일정하게 유지하면서 웹을 이송 시키기 위한 기계요소로, 웹을 푸는 풀림롤과 여기서 풀려 나온 웹이 감김롤에 이송되어 감겨지는 구조를 이루고 있다.

필름의 정밀 가공 기술에 상당히 밀접한 영향을 나타내는 소재의 장력은 이들 각 롤의 속도차에 의해서 변화하게 된다. 따라서, 소재의 장력을 제어하기 위해서는 각 롤의 속도를 다르게 제어할 수 있는 기계적 구조가 필요하다. 이를 위해 각 롤은 독립된 액츄에이터(actuator)와 연결되어야 한다. 또한, 마찰력은 매우 작으므로 무시하고 웹은 기계요소 중 스프링과 댐퍼로 표현할 수 있으며, 각각의 롤은 시간의 변화에 따른 모델 자체의 변화 즉, 반경과 관성모멘트의 변화를 고려해야 한다. 주어진 시스템을 간단한 기계요소로 표현 해 보면 다음 Fig.1과 같이 나타낼 수 있다.

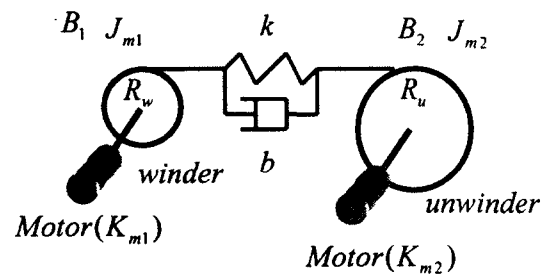


Fig. 1 System model

2.1 감김롤의 경우

시간의 변화에 따라 감김롤은 반경의 증가와 관성 모멘트의 변화를 보이며 이는 시간에 대한 감김롤의 회전수와 의 함수 관계로 나타내어진다.

$$R_w(\tau) = R_1 = R_{iw} + \Delta R = R_{iw} + \frac{\theta_1}{2\pi} h_{web} \quad (1)$$

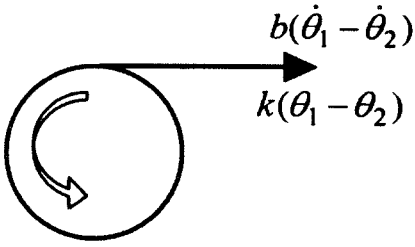


Fig. 2 Winder roll

$$J_{R1} = J_{Roll,R_u} + J_{web,R_u} + \Delta R - J_{web,R_u} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

위 (1)식 중 우변의 첫번째 항은 초기 반경을 나타내며 두 번째 항은 반경의 증가를 나타낸다. 또한 (2)식 중 우변의 첫번째 항은 롤러만의 관성모멘트, 두 번째 항은 증가된 전체반경에 대한 웹의 관성모멘트, 세 번째 항은 롤러반경에 해당하는 웹의 관성모멘트를 나타낸다.

2.2 풀림롤의 경우

마찬가지로 풀림롤의 경우에도 시간의 변화에 따라 반경의 감소와 관성 모멘트의 변화를 보이는 데 각각은 시간에 대한 풀림롤 회전수와의 함수 관계로 나타내어진다.

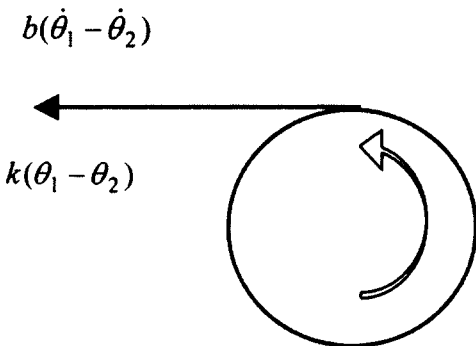


Fig. 3 Unwinder roll

$$R_u(\tau) = R_2 = R_{iu} - \Delta R = R_{iu} - \frac{\theta_2}{2\pi} h_{web} \quad (3)$$

$$J_{R2} = J_{Roll,R_u} + J_{web,R_u-\Delta R} - J_{web,R_u} \quad (4)$$

식(4)에서 우변의 첫번째 항은 롤러만의 관성모멘트, 두 번째 항은 감소된 전체반경에 대한 웹의 관성모멘트, 세 번째 항은 롤러반경에 해당하는 웹의 관성모멘트를 나타낸다.

따라서 각 롤의 상태 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = & \frac{-kR_1^2}{(J_{R1} + J_{m1})} x_1 + \frac{kR_1R_2}{(J_{R1} + J_{m1})} x_3 \\ & + \frac{(-bR_1^2 - B_1 - B_{m1})}{(J_{R1} + J_{m1})} x_2 + \frac{bR_1R_2}{(J_{R1} + J_{m1})} x_4 \\ & + \frac{K_{m1}}{(J_{R1} + J_{m1})} U_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = & \frac{kR_1R_2}{(J_{R2} + J_{m2})} x_1 + \frac{-kR_2^2}{(J_{R2} + J_{m2})} x_3 + \frac{bR_1R_2}{(J_{R2} + J_{m2})} x_2 \\ & + \frac{(-bR_2^2 - B_2 - B_{m2})}{(J_{R2} + J_{m2})} x_4 + \frac{K_{m2}}{(J_{R2} + J_{m2})} U_2 \end{aligned} \quad (8)$$

3. 비선형 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어기는 n차원을 갖는 시스템에 대해서 n-1차의 시변 슬라이딩 평면을 정의하여 비선형 시스템의 제어에 대해 가능성을 갖도록 한다. 즉, 대부분 n차 미분방정식으로 주어지는 비선형시스템의 운동방정식을 1차 미분 방정식으로 변환이 가능하다면, 1차의 경우 비선형(nonlinear)이고 불확실성(uncertain)에 대해서도 비교적 제어가 용이하기 때문이다. 이러한 경우 이 슬라이딩 면의 정의에는 제어대상 변수들이 포함된다.

3.1 슬라이딩모드 제어법 유도

다음과 같은 일반적인 시스템을 고려해 보자.

$$\dot{x}_n = f(x,u) + y_d \quad (9)$$

여기서 $x \in R^n$ 은 상태변수, $u \in R$ 은 제어입력, $f(x,u) : R^n \times R \rightarrow R$ 은 비선형 함수, $y_d \in R$ 는 불확정성 외부 외란 또는 모델화되지 않은 동적 거동 현상이

다. 외란 y_d 는 e 와 y 로 구분하며 y_d 는 y 의 추정값이고 e 는 추정오차이다.

$$e = y - y_d \quad (10)$$

$x_1(t)$ 가 원하는 $x_{1d}(t)$ 를 추종하도록 하고 $x_{1d}(t)$ 가 충분히 $n-1$ 번 미분 가능하다고, 즉 $x_{1d}^{(i-1)} (\equiv x_{id})$, ($i = 1, 2, \dots, n$) 는 연속이라고 가정한다.

슬라이딩 평면 s 가 0이 되도록 다음과 같이 정의한다.

$$s = \left(\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \lambda_{n-1} \frac{d^{n-2}}{dt^{n-2}} + \dots + \lambda_2 \frac{d^2}{dt^2} + \lambda_1 \right) e_1 \quad (11)$$

여기서 λ_i 는 양의 상수이고, e_1 은 추종 오차이다.

또한, 슬라이딩 방정식을 정의하기 위해서 다음과 같이 정의 하면,

$$e = s = y - y_d \quad (12)$$

단, y_d : 상태변수 출력 (desired state output)

이 식을 이용하면 오차평면(error surface)의 동역학을 구할 수 있다.

$$s \equiv \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \cdot e \quad (13)$$

n : 상대 자유도(relative degree)

λ : 양의 상수(strictly positive constant)

n 값은 에러 값을 미분해서 입력(u)를 포함하는항이 나타날 때 n 계 도함수의 값으로 정해진다.

또한, 다음의 슬라이딩 조건을 만족하면 되고,

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (14)$$

단, η 는 양의 상수(positive constant)

다시 쓰면,

$$\dot{e} = \dot{s} = \dot{y} - \dot{y}_d = -\eta \operatorname{sgn}(s) \quad (15)$$

위의 식에서 제어입력(control input)을 얻는다.

3.2 이송속도제어

필름의 이송은 작업 공정상의 이유로 대부분 정속도 이송을 요구한다. 본 연구에서는 감김롤의 모터를 제어하여 비선형 특성을 갖는 필름의 이송속도를 일정속도가 되도록 제어한다.

여기서 오차 e_1 는 다음과 같이 정의된다.

$$e_1 = y - y_d \quad (16)$$

여기서, $y = R_1 \dot{\theta}_1$: 필름의 이송 속도

y_d : 원하는 이송 속도

이 때의 오차동역학(error dynamics)는 1차의 상대 자유도를 가지며, (13)식에서

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^0 \cdot e = e$$

$$\dot{s} = \dot{y} - \dot{y}_d = (R_w + \frac{h_{web}}{2\pi} x_1) \dot{x}_2 - \frac{h_{web}}{2\pi} x_2^2 \quad (17)$$

이 때의 슬라이딩 모드 제어 입력 U_1 을 구하면,

$$U_1 = \frac{N_1}{D_1} - \frac{f_1(x)}{b_1(x)} \quad (18)$$

$$N_1 = -\eta \operatorname{SAT}(R_w x_2 + \frac{h_w}{2\pi} x_1 x_2 - \operatorname{const}) - \frac{h_w}{2\pi} x_2^2 \quad (19)$$

$$D_1 = (R_w - \frac{h_w}{2\pi} x_1) b_1(x) \quad (20)$$

$$f_1(x) = \frac{-kR_1^2}{(J_{R1} + J_{m1})} x_1 + \frac{kR_1 R_2}{(J_{R1} + J_{m1})} x_3$$

$$+ \frac{(-bR_1^2 - B_1 - B_{m1})}{(J_{R1} + J_{m1})} x_2 + \frac{bR_1 R_2}{(J_{R1} + J_{m1})} x_4 \quad (21)$$

$$b_1(x) = \frac{K_{m1}}{(J_{R1} + J_{m1})} \quad (22)$$

$$\text{단, } \operatorname{SAT}\left(\frac{S}{\Phi}\right) = \begin{cases} 1 & |S| > \Phi \\ \frac{S}{\Phi} & |S| < \Phi \\ -1 & |S| > \Phi \end{cases}$$

여기서 제어기의 채터링을 방지하기 위하여 부호함수 (sign function) 대신에 포화함수(saturation function)을 사용하였으며, Φ 는 채터링(chattering)을 방지하기 위한 경계층(boundary layer)의 두께이다.

3.3 장력제어

필름의 장력을 일정하게 유지하기 위한 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 소재의 장력을 최소화 하기 위한 방법을 사용한다. 이를 위해 풀림롤을 제어하여 풀림롤의 이송 속도가 감김롤의 이송속도를 추정함으로써 장력을 최소화 하도록 한다. 장력은 풀림롤과 감김롤 이송량의 상대적인 차이와 관계가 있으므로 최소장력을 유지하기 위해서는 오차방정식이 다음과 같이 표현되어야 한다.

$$e_2 = y - y_d \tag{23}$$

여기서, $y = R_2\theta_2$: 풀림롤의 이송량
 $y_d = R_1\theta_1$: 감김롤의 이송량

이 때의 오차동역학은 2차의 상대자유도를 가지며

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^2 \cdot e = \dot{e} + \lambda \cdot e = \dot{y} - \ddot{y}_d - \lambda(y - y_d) \tag{24}$$

제어 입력 U_2 을 구하면,

$$U_2 = \frac{N_2}{D_2} - \frac{f_2(x)}{b_2(x)} \tag{25}$$

$$D_2 = \left(R_i - \frac{h_w}{\pi}x_3\right)b_2(X) \tag{26}$$

$$N_2 = \left[\frac{h_w}{\pi}x_4^2 + \left(R_w + \frac{h_w}{\pi}x_1\right)\dot{x}_2 + \frac{h_w}{\pi}x_2^2 - \lambda\left(R_i - \frac{h_w}{\pi}x_3\right)x_4 + \lambda\left(R_w + \frac{h_w}{\pi}x_1\right)x_2 - \eta SAT\left\{\left(R_i - \frac{h_w}{2\pi}x_3\right)x_4 - \left(R_w + \frac{h_w}{\pi}x_1\right)x_2 - \lambda\left(R_i - \frac{h_w}{2\pi}x_3\right)x_3 + \lambda\left(R_w + \frac{h_w}{2\pi}x_1\right)x_1\right\}\right] \tag{27}$$

$$f_2(x) = \frac{kR_1R_2}{(J_{R2} + J_{m2})}x_1 + \frac{bR_1R_2}{(J_{R2} + J_{m2})}x_2 + \frac{-kR_2^2}{(J_{R2} + J_{m2})}x_3 + \frac{(-bR_2^2 - B_2 - B_{m2})}{(J_{R2} + J_{m2})}x_4 \tag{28}$$

$$b_2(x) = \frac{K_{m2}}{(J_{R2} + J_{m2})} \tag{29}$$

위에서 첫번째 슬라이딩 모드 제어기는 웹의 이송 속도를 일정하게 하도록, 두 번째 슬라이딩 모드 제어기는 일정 속도로 이송되는 웹의 장력을 일정하게 하도록 한다.

4. 시뮬레이션

앞에서 언급한 바와 같이 시스템의 모델과 구성된 두 개의 슬라이딩 모드 제어기를 상용프로그램인 Simulink를 이용하여 구현하였다. Simulink는 Matlab의 툴박스(toolbox)로서 블록선도(block diagram)의 형태로 모델을 구성하기 때문에, 특히 비선형 시스템이나 제어기의 구현에 유용하다. 구성된 Simulink 모델을 나타내면 다음의 Fig. 4와 같다.

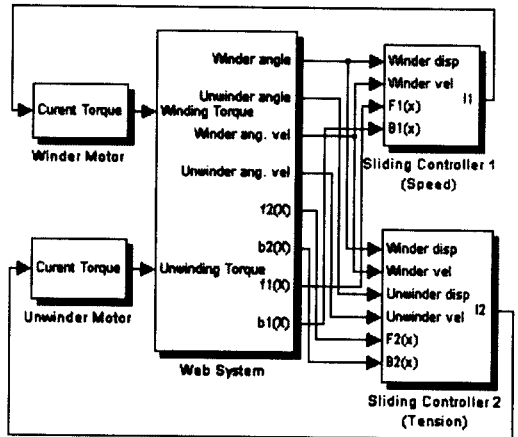


Fig. 4 Simulink model

위에서 설계한 슬라이딩 모드 제어기의 유용성을 보기 위하여 본 논문에서는 다양한 입력에 대해서 PID제어기와 비교 모의 실험을 하였다. 이때 사용한 매개변수들의 값을 다음 Table 1에 나타내었다.

첫번째 시뮬레이션으로 필름의 이송속도를 0.05 (m/s)로할 때 풀림롤과 감김롤의 속도와 장력의 시간에 대한 변화를 PID제어기와 슬라이딩모드제어기를 비교 하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보듯이 PID제어기는 각각의 속도 그래프에서 과도응답이 슬라이딩 제어기에 비해 나쁜진

Table 1 Used parameters

| Parameter | Value | Units |
|----------------------------|-------|--------------------|
| Web stiffness | 50 | N/m |
| Web damping ratio | 0.001 | Ns ² /m |
| Web thickness | 6e-7 | m |
| Motor damping ratio | 0.02 | Nm/(rad/s) |
| Motor constant | 0.206 | Nm/A |
| Moment of inertia of motor | 0.003 | Kgm ² |

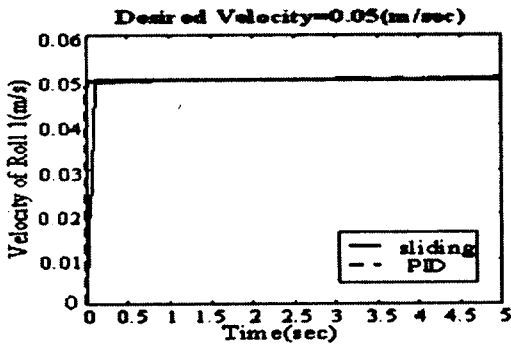


Fig.5 The velocity of roll #1 at v=0.05(m/s)

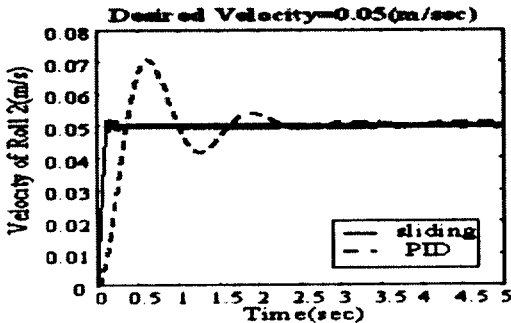


Fig.6 The velocity of roll #2 at v=0.05(m/s)

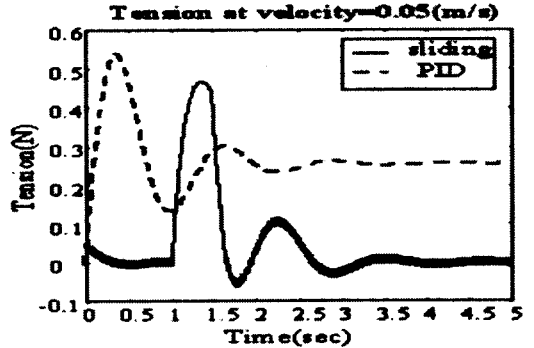


Fig.7 The tension graph at v=0.05(m/s)

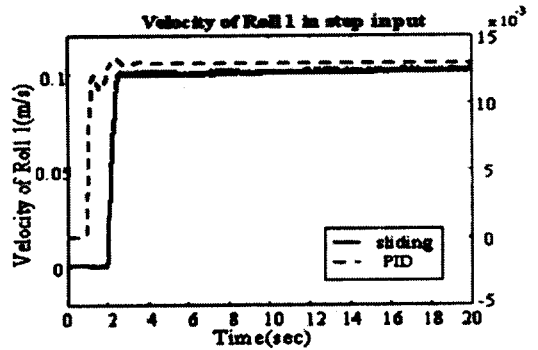


Fig.8 The velocity graph of roll#1 at step input

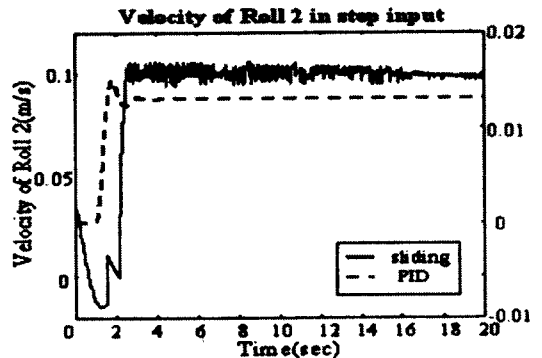


Fig.9 The velocity graph of roll#2 at step input

하지만 모두 원하는 속도에 추종함을 알 수 있다. 장력 그래프의 경우에도 Fig. 7에서와 같이 정착시간(settling time)이 약간 늦지만 일정한 장력을 유지하면서 이동함을 알 수 있다.

두번째로는 시스템에 계단입력(step input)을 가했을 경우 폴림롤과 감김롤의 속도와 장력의 시간에 대한 변화를 PID제어기와 슬라이딩모드제어기를 비교하였다.

위의 시뮬레이션에서 각각 제어기의 게인값(gain value)은 원하는 이송속도를 입력으로 했을 때의 값을 그대로 사용한 결과이며, Fig. 8과 Fig. 9는 이때 양쪽 롤러에서의

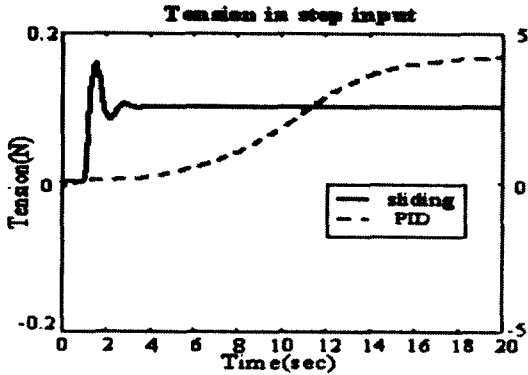


Fig.10 The graph of tension at step input

(단, 좌측 스케일(좌표값)은 슬라이딩 제어기의 값이고 우측은PID제어기의 경우 좌표축 값이다)

속도를 나타낸다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이PID제어기의 경우 계단입력 속도값을 추종할 수 없었으나 슬라이딩 모드제어기는 잘 추종함을 알 수 있다. 장력 또한 Fig. 10에서와 같이 PID제어기는 원하는 값에 수렴하지 못하며 슬라이딩모드제어기는 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다.

세번째로 시스템에 사다리꼴입력을 가했을 경우 즉, 속도의 변화가 있을 경우에 대하여 마찬가지로 각 제어기를 비교하였다.

사다리꼴 입력, 즉 가속도가 있는 속도 프로파일 입력을 가한 경우에서도 Fig. 11과 Fig. 12의 그래프에서 보듯이 PID제어기는 원하는 속도값을 전혀 추종할 수 없으나 슬라이딩 제어기는 정확히 사다리꼴 속도를 추종함을 알 수

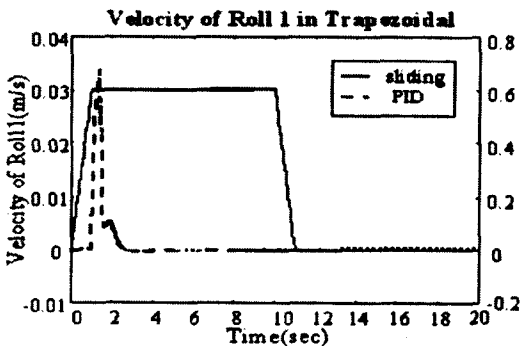


Fig. 11 The velocity graph of roll #1 at trapezoidal input

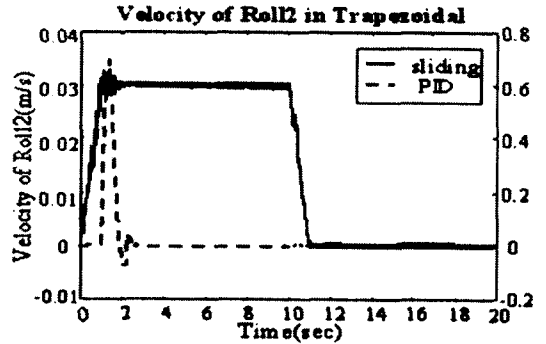


Fig. 12 The velocity graph of roll #2 at trapezoidal input

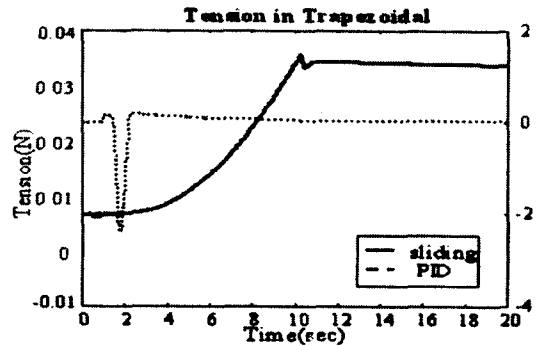


Fig. 13 The graph of tension at trapezoidal input

있다. 또한 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 슬라이딩 제어기만이 수렴시간이 늦기는 하지만 원하는 장력값에 수렴함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 슬라이딩모드 제어기의 성능이 PID제어기에 비해서 훨씬 좋음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 비선형 특성을 가지는 웹의 이송에 대한 연속 이송공정 시스템을 모델링 하였으며, 시스템의 속도 제어와 장력 제어를 위한 슬라이딩모드 제어기를 설계하였다.

다양한 입력에 대한 시뮬레이션을 결과에서 보듯이 제한한 슬라이딩 제어기는 PID 제어기에 비해서 계단입력이나 사다리꼴 입력 등 여러 입력에 대하여 잘 추종하며, 시스템이 모델에 대한 불확실성을 가질 때에도 주어진 입력에 대하여 강인하게 추종함을 보였다. 이는 반도체 제작

공정의 이송 필름과 같이 속도가 변하거나 정지와 동작을 반복하는 연속 공정시스템에 유용하게 적용될 수 있음을 말한다. 향후 과제로서는 정착시간을 단축시키고, 외란이나 여러 모델링 오차 등을 고려한 제어기 설계가 필요하다고 생각한다.

후 기

이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-98-018-E00113).

참 고 문 헌

- (1) D.P. Stoten and M.G. Dye, "The application of minimal control synthesis to web tension and transport control", IECON, pp.2019~2023, 1993.
- (2) John E. Ludwicki and Raman Unnikrishnan, "Automatic control of unwind tension in finishing applications", IECON, pp. 774~779, 1995.
- (3) Masanori Shioya, Naoharu Yoshtani, and Takatsugu Ueyama, "Noninteracting control with disturbance compensation and application to tension-looper control for hot strip mill", IECON, pp. 229~234, 1995.
- (4) M.F. Yeung, A.H. Falkner, and S. Gergely, "The control of tension in textile filament winding", Jurnal of Mechatronics, 1995.
- (5) 신기현, "연속 공정 시스템에서의 장력의 가변 이득 PID제어", 대한 기계 학회 논문집, 제19권 제3호, pp. 724~730, 1995.
- (6) K.N. Reid, K.H. Shin, and K.C. Lin, "Variable-gain control of longitudinal tension in a web transport system", AMD Vol. 149, Web Handling, ASME, 1996.
- (7) 백승훈, 윤석찬, 한창수, 정진태, "비선형 박판 정밀 이송시스템의 모델링 및 제어", 춘계 정밀 학회, pp. 785~788, 1999.
- (8) Jean-Jacques E. Slotine, and Weiping Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International, Inc., 1991.
- (9) Yeong Seob Kueon, "Sliding Mode Mould Level Control in Continuous Casting Process", 한국공작기 계학회지, 8V.7, n.4, pp. 50~55, 1998.