

## 필름 이송 시스템의 강인한 장력 제어에 관한 연구

양희철\*(한양대기전공학과원), 윤석찬(한양대BK21기계사업단), 한창수(한양대기계공학과)

### A study on the Design of a Robust Tension Controller in a Film Transfer System

Hee Chul Yang\*, Seok Chan Yun, and Chang Soo Han

#### Abstract

This paper presents the non-linear modeling and design of a robust sliding mode controller for film transfer systems. The tension of a film is sensitive to the speed difference between a winder and an unwinder. The change of the roll-radius as well as the moment of inertia result in the film transfer system being variable and non-linear. In designing the robust controller, two major aims are considered. The first aim is that the web transferring speed tracks at any given reference speed; the second one is that the tension of the film tracks at any given reference tension. To verify the control algorithm, a Simulink model was built and compared with a conventional PID controller. In a computer simulation study, the suggested robust sliding mode controller shows better performance than the PID controller at various control inputs.

**Keywords:** thin film(얇은 필름), tension control(장력제어), speed control(속도제어), film transfer system(필름이송장치)

#### Nomenclature

$B_u, B_w$	damping coefficient of roller bearing
$B_{mu}, B_{mw}$	damping coefficient of (un)winder motor
$b$	damping coefficient of film
$h_{wb}$	thickness of film
$I_u, I_w$	motor current input
$J_{mu}, J_{mw}$	moment of inertia of (un)winder motor
$J_{ur}, J_{wr}$	moment of inertia of (un)winder roller
$K_{mw}, K_{mu}$	motor constant of (un)winder motor
$k$	stiffness of film
$R_u, R_w$	radius of (un)winder roll
$w$	width of film
$\theta_u, \theta_w$	rotating angle of (un)winder

### 1. 서론

필름 이송시스템은 연속적이고 매우 길며, 구부러지기 쉬운 얇은 필름 재료를 초기의 풀림롤(unwinder)로부터 감김롤(winder)로 이송하는 장치로서 필름 이송장치, 인쇄기의 종이 이송장치, 반도체 공정의 웨이퍼 이송장치 등의 광범위한 분야에서 사용되는 시스템이다. 이러한 필름 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.

얇은 필름의 장력을 제어하기 위해서 Stangroom은 1990년에 ERF(Electro Rheological Fluid)를 이용한 클러치를 제작하여 시스템의 스펙 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 장력 제어에 적용하였다[9]. 또한 Yeung등은 1995년에 퍼지제어(fuzzy control)를 이용하여 가는 선(wire) 재료를 고속으로 감을 때의 장력제어에 관한 연구를 수행하였고[10], Shin은 1996년에 연속 공정 시스템의 종방향 운동에 관한 모델링 및 가변 이득(variable-gain) PID 제어에 관하여 연구하였다[5,6]. Yun등은 2000년에 필름의 강인한 속도 제어 및 장력 유지를 위해 슬라이딩 제어기 sliding mode control을 제안 하였다[11]. 그러나 이들 제어기는 장력의 유지(legulating)하는 면에서는 좋은 성능을 보이나 임의로 변하는 장력을 추종(tracking)하는 면에서는 성능이 저하 되는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 필름 이송시스템에서 이송 필름의 장력변동을 제어하여 임의로 변하는 장력을 추종하도록 하며 강인한 장력 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어기의 설계를 최종 목표로 하고 있다.

### 2. 시스템 모델링

필름 이송 시스템에서 필름은 일정한 장력을 가지고 풀림롤에서 감김롤로 이송 된다. 필름에서의 장력은 풀림롤과 감김롤의 속도차이의 장력의 변화와 밀접한 관계가 있다. 따라서, 소재의 장력을 제어하기 위해서는 각 롤의 속도를 다르게 제어 할 수

있는 기계적 구조가 필요하다. 이를 위해 각 물은 독립적인 액추에이터(actuator)와 연결 되어야 한다. 본 논문에서 대상으로 하는 시스템의 집중 질량 모델은 다음 Fig 1과 같다.

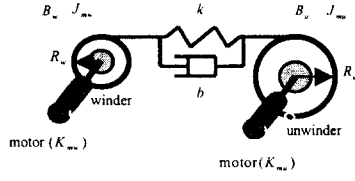


Fig.1 System model

필름 이송 시스템은 각 시스템의 구성에 따라 여러 모델이 제안 되어 왔다. Shin[5,6]은 multi-span에서 각 부분의 장력을 이산 방정식으로 나타내었으며, Yun[11]은 단일 스펠 공정에서 각 롤의 비선형 운동 방정식을 제안 하였다. 본 논문에서 Yun[11]의 모델을 이용하기로 한다. 감김롤의 경우 시간의 변화에 따라 감김롤의 반경의 증가와 관성 모멘트의 변화를 보이며 이는 시간과 감김롤의 회전각에 대한 함수로 표현 할 수 있다. Fig.2는 감김롤의 형상을 나타내며 반경은 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_w(\tau) = R_{wr} + \Delta R_w = R_{wr} + \frac{\theta_w}{2\pi} h_{wcb} \quad (1)$$

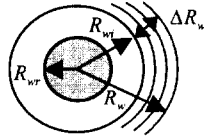


Fig.2 Schematic of the winder

감김롤의 관성 모멘트는 롤과 필름 관성의 합이며 다음 식 (2)와 같다.

$$J_w = \frac{1}{2} \pi w \left[ \rho_{roll} R_{wr}^4 + \rho_{wcb} \left( R_{wr} + \frac{\theta_w}{2\pi} h_{wcb} \right)^4 - \rho_{wcb} R_{wr}^4 \right] \quad (2)$$

식(2)의 오른쪽항에서 첫번째 항은 롤의 관성 모멘트이고 두번째와 세번째항은 웹의 관성 모멘트를 나타낸다. 풀림롤은 시간이 지남에 따라 반경이 감소하므로 반경과 관성 모멘트는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_u(\tau) = R_{ur} - \Delta R_u = R_{ur} - \frac{\theta_u}{2\pi} h_{wcb} \quad (3)$$

$$J_u = \frac{1}{2} \pi w \left[ \rho_{roll} R_{ur}^4 + \rho_{wcb} \left( R_{ur} - \frac{\theta_u}{2\pi} h_{wcb} \right)^4 - \rho_{wcb} R_{ur}^4 \right] \quad (4)$$

감김롤과 풀림롤 사이의 웹은 Fig. 1 과 같이 스프링과 댐퍼 요소로 모델링 할 수 있다. 위에서 유도한 식 (1)-(4)를 이용하여 Fig. 1의 필름이송 시스템의 운동 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$(J_w + J_{mw}) \ddot{\theta}_w = -R_w F_s(t) - R_w F_d(t) - (B_w + B_{mw}) \dot{\theta}_w + K_{mw} J_u \quad (5)$$

$$(J_u + J_{mu}) \ddot{\theta}_u = R_u F_s(t) + R_u F_d(t) - (B_u + B_{mu}) \dot{\theta}_u + K_{mu} J_w \quad (6)$$

여기서  $F_s, F_d$ 는 각각 인장시에만 힘을 받는 필름의 비선형 스프링, 댐핑 힘을 나타낸다[11].

### 3. 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어기의 개념은 n차의 시스템에 대하여 n-1차의 시변 슬라이딩 평면을 정의하고, 제어 입력이 이 평면 위에서 스위칭 하도록 함으로써 제어가 가능 하도록 하는 제어기 이다. 일단 시스템이 슬라이딩 평면 내로 들어 가면 시스템의 페루프 동역학은 슬라이딩 평면을 정의 하는 식에 의해 지배 받게 된다. 이때, 슬라이딩 평면을 정의 하는 인자들은 설계자가 선택하게 되므로 시스템의 페루프 동역학은 시스템 인자들의 변화에 독립적인 강인한 특성을 가지게 된다. 이는 필름 이송 장치에서 외란과 noise를 배제 시킬 수 있는 강인한 제어기를 설계 할 수 있다는 의미가 된다. 또한 강인한 슬라이딩 모드 제어기의 특성을 사용하면 모델링이 되지 않은 여러 비선형 동역학을 일정한 범위 내에서 보상 할 수 있다.

#### 3.1 장력제어

장력제어는 몇 가지의 방법이 있다. 그러나 본 논문에서는 감김롤과 풀림롤 사이의 장력이 최소 오차를 가지면서 주어진 임의의 장력을 추종 (tracking) 하도록 하는 방법을 사용한다. 감김롤과 풀림롤 사이의 장력은 다음 식(7)과 같이 표현된다.

$$T = EA \cdot \Delta x = k \cdot \Delta x = k(R_w \theta_w - R_u \theta_u) \quad (7)$$

이때의 장력 오차는 다음과 같다.

$$e_t = y_t - y_d \quad (8)$$

여기서,  $y_t = k(R_w \theta_w - R_u \theta_u)$

: tension between the winder roll and the unwinder roll

$y_d$  : desired tension value

이 시스템의 오차 동역학은 2차의 상대 자유도 (relative degree)를 가지며, 이때의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의 된다.

$$s = kR_w(\theta_w + \lambda\theta_w) - kR_u((\theta_u + \lambda\theta_u) - y_d) - \lambda y_d \quad (9)$$

이때의 슬라이딩 평면은 감김롤과 풀림롤 사이의 장력 추종 오차에 대한 평면이라 생각 할 수 있다.

여기에서  $s$ 가 0으로 수렴 할 때, 필름의 장력은 기준 장력을 추종 하게 된다. 위 슬라이딩 조건을 만족 시키는 공칭 제어 입력  $\hat{I}_u$ 은 다음 식 (10)과 같다.

$$\hat{i}_u = \left( \frac{J_u + J_{mu}}{K_{mu}} \right) \left[ \frac{\left( kR\hat{\theta}_w + k\frac{h_{mu}}{\pi}(\theta_w^2 + \theta_w^2) + \lambda kR\hat{\theta}_w - \lambda kR\hat{\theta}_w - \dot{y}_d - \lambda \dot{y}_d \right)}{kR} - \frac{R_u F_u(t) + R_u F_u(t) - (B_u + B_{mu})\hat{\theta}_w}{J_u + J_{mu}} \right] \quad (10)$$

모델의 불확실성에 상관 없이 슬라이딩 조건들을 만족 시키기 위해서는 불연속항이  $\hat{I}_u$ 에 포함되어야 한다[4].

$$I_u = \hat{I}_u - \frac{J_u + J_{mu}}{K_{mu}} k_u \text{sgn}(s) \quad (11)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} \text{sgn}(s) = +1 & \text{if } s > 0 \\ \text{sgn}(s) = -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (12)$$

여기서  $\hat{I}_u$ 을 식 (11)에 대입한 후 다음과 같은 Lyapunov 안정도 조건을 만족 시키도록 한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta_u |s| \quad (13)$$

$$\text{or } s \dot{s} \leq -\eta_u |s| \quad (14)$$

여기서  $\eta_u$ 는 양의 상수이며 슬라이딩 파라미터의 미분은 다음과 같이 표시 된다.

$$\dot{s} \leq -\eta_u \text{sgn}(s)$$

따라서, 식 (11)의 제어 이득  $k_u$ 는 다음의 조건을 만족 시켜야 한다[4].

$$k_u \geq |\Delta f_u + D_u| + \eta_u \quad (15)$$

여기서,  $\Delta f_u$ : modeling error and parameter uncertainties

$D_u$ : disturbance in the unwinder dynamics

일반적인 시스템에서 대부분의 슬라이딩 모드 제어기가 구현해야 할 고속의 스위칭 제어를 수행하기는 매우 어렵다. 여기에서는 두 가지 이유가 있는데 첫째, 제어기 구현시 시간 지연이 존재하기 때문이고 둘째는, 물리적인 액추에이터의 한계성 때문이다. 실제로 무한한 속도로 스위칭 하기는 불가능 하며, 항상 슬라이딩 표면에는 채터링(chattering)이 존재한다. 이러한 채터링을 극복하기 위한 방법중의 하나는 슬라이딩 표면에 경계층을 도입하고 이 안에 연속제어에 의한 switching 제어를 근사화 하는 것이

다. 따라서 식(11)의 제어 법칙은 다음과 같은 경계층 함수에 의해서 대체 될 수 있다.

$$I_u = \hat{I}_u - \frac{J_u + J_{mu}}{K_{mu}} k_u \text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) \quad (16)$$

여기서  $\Phi$ 는 경계층의 두께이고  $\text{sat}(\cdot)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} \text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) = \frac{s}{\Phi} & \text{if } \left|\frac{s}{\Phi}\right| \leq 1 \\ \text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) = \text{sgn}\left(\frac{s}{\Phi}\right) & \text{if } \left|\frac{s}{\Phi}\right| > 1 \end{cases} \quad (17)$$

### 3.2 이송 속도 제어[4]

일반적으로 웹 이송 시스템에서 여러 이유 일정한 이송 속도가 요구 된다. 본 연구에서는 이송 속도를 제어 하기 위해서 Yum에 의해 제안된 감김롤의 모터를 제어 하는 방식을 사용한다. 필름의 이송 속도 오차는 다음과 같다.

$$e_s = y_s - y_{sd} \quad (18)$$

여기서,  $y_s = R_w \hat{\theta}_w$ : transferring speed of film

$y_{sd}$ : desired speed

이 시스템의 연속 공칭 입력 제어 압력은 다음과 같다.

$$\hat{i}_w = \frac{J_w + J_{mw}}{K_{mw}} \left[ \frac{-\frac{h_{mw}\hat{\theta}_w^2}{2\pi} + R_w F_w(t) + R_w F_w(t) + (B_w + B_{mw})\hat{\theta}_w}{R_w} - \frac{R_w F_w(t) + R_w F_w(t) + (B_w + B_{mw})\hat{\theta}_w}{J_w + J_{mw}} \right] \quad (19)$$

모델의 불확실성에 관계 없이 슬라이딩 조건을 만족 시키기 위해서는 다음과 같이 불연속 항이 추가 되어야 한다.

$$I_w = \hat{I}_w - \frac{J_w + J_{mw}}{K_{mw}} k_w \text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) \quad (20)$$

$$\dot{s} = f_w + b_w \left( \frac{1}{b_w} (\dot{y}_{sd} - f_w) - \frac{k_w}{b_w} \text{sgn}(s) \right) + \Delta f_w + D_w - \dot{y}_{sd} \leq -\eta_w \text{sgn}(s) \quad (21)$$

마지막으로 식(20)의 게인  $k_w$ 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$k_w \geq |\Delta f_w + D_w| + \eta_w \quad (22)$$

여기서,  $\Delta f_w$ : modeling error and parameter uncertainties of the unwinder dynamics

$D_w$ : disturbance in the unwinder dynamics

## 4. Simulation

제안된 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 PID 제어기와 비교 하였다. 이 때 웹 이송 모델과 제어 알고리즘을 시뮬링크 모델로 구현 하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Model Parameters

Parameter	Value	Units
Film stiffness	50	N/m
Film damping ratio	0.001	$Ns^2/m$
Film 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	$Kgm^2$

4.1 기준 속도와 장력 추종 성능

이 시험은 감김롤과 풀림롤 사이의 장력이 최소 오차를 유지 하면서 기준 장력을 추종 하도록 하는 시험이다. 기준 속도와 장력 추종 성능을 보기 위하여 Fig. 3과 같은 사다리꼴 속도 입력과 Fig. 4의 사다리꼴 장력 입력을 사용하였다.

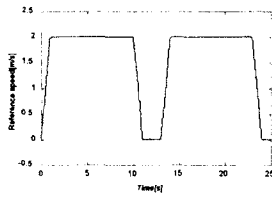


Fig. 3 Reference trapezoidal speed input profile [=2(m/s)]

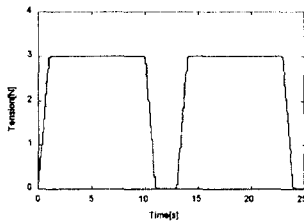


Fig. 4 Reference trapezoidal tension input profile [=3(N)]

Fig. 5와 Fig. 6 은 필름의 속도와 장력을 나타낸다. 여기서 점선은 PID 제어기이고 실선은 슬라이딩 제어를 나타낸다. 이 그림들에서 두 제어기의 성능은 모두 만족 할 만 하나 슬라이딩 제어기는 사다리꼴 입력에서 PID 제어기 보다 더 좋은 성능을 보인다.

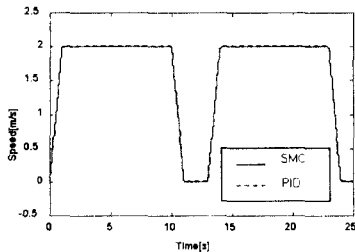


Fig.5 Transferring speed about trapezoidal input

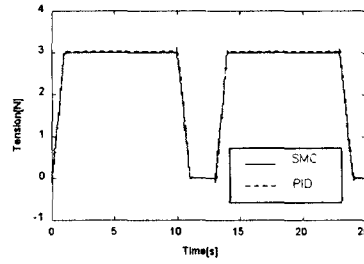


Fig.6 Tension variation about trapezoidal input

4.2 기준 장력 변화에 대한 성능

제조 공정상의 여러 가지 이유로 인하여 이름의 이송 장력은 변화하게 되고, 필름은 이 장력 값을 정확히 추종해야 한다. 그러나 계인을 다시 조정 하여 맞추는 것은 매우 어렵고 시간을 많이 소모하는 작업이다. 장력 변화에 따른 추종 성능을 고찰하기 위하여 사다리꼴 기준 장력의 크기를 두배로 하였으며, 이때 사용된 모든 계인은 앞의 시뮬레이션과 같은 값을 사용 하였다. 슬라이딩 모드 제어기는 모델 구조가 자동으로 바뀌면서 제어 입력을 추종 하므로 슬라이딩 모드 제어기는PID 제어기보다 우수한 성능을 보여준다.

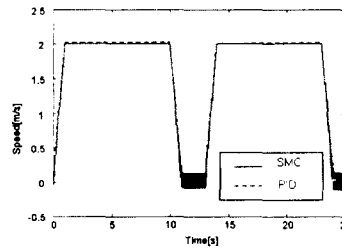


Fig. 7 Transferring speed for the reference tension change

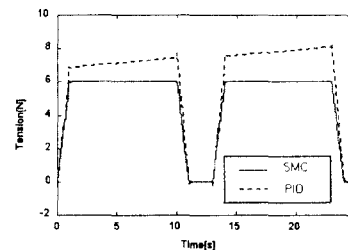


Fig. 8 Tension variation for the reference tension change

4.3 시스템 파라미터 변화에 대한 추종 성능

일반적인 모델 기준 제어기는 시스템의 공칭 모델에 근거해서 제어를 설계하나, 슬라이딩 제어기는 공칭 모델뿐 아니라 모델의 불확실성까지 고려 하여 설계 되므로 시스템 파라미터의 변화에 대해 강인한 성능을 보인다. 다음의 Fig. 9와 Fig. 10은 필름의 강

성을 10% 증가시켰을때의 결과를 나타내며 슬라이딩 제어가 PID 제어기에 비해 강인한 성능을 보인다.

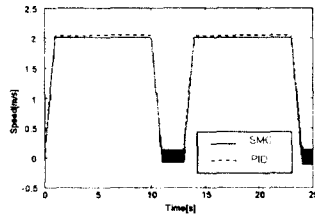


Fig.9 Transferring speed for the parameter change

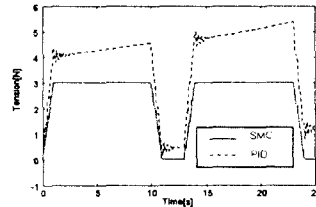


Fig.10 Tension variation for the parameter change

#### 4.4 모터 토크 외란에 따른 추종 성능

필름 이송시에 여러 이유로 인하여 갑작스런 외란이 공정에 가해질 수 있으며, 이때 외란은 필름의 속도와 장력 변화를 야기 시킨다. 이 시험에서 외란은 사다리꼴 장력의 10% 크기가 5초에서 6초 사이에 가해지는 것으로 하였으며 모든 게인 값은 이전 실험의 값과 같다. 이 시험의 결과를 Fig. 11 과 Fig. 12에 나타내었다. 이 시험에서 슬라이딩 제어를 사용할 경우 장력 변화와 속도 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기는 예기치 못한 외란이 가해졌을 때 이를 배제하는 강인한 성능이 있음을 알 수 있다.

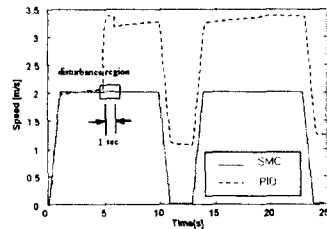


Fig.11 Transferring speed for external disturbance

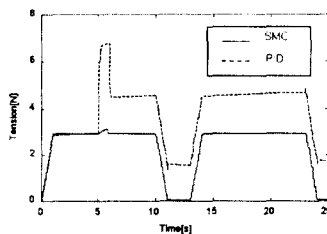


Fig.12 Transferring tension for external disturbance

## 5. 결론

본 연구에서는 필름 이송 시스템의 강인한 장력 제어를 제안 하였다. 제어기는 비선형 시스템의 대표적인 제어기인 슬라이딩 모드 제어기를 사용 하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

1. 슬라이딩 모드 제어기 이론을 이용하여 주어진 기준 장력 입력을 추종하는 제어기를 제안 하였다.
2. 기준 장력 변화가 있을 때 PID 제어기에 비해 제안된 슬라이딩 제어기의 응답 속도와 장력 제어 성능이 더 좋음을 알 수 있다.
3. 슬라이딩 모드 제어기는 모델 파라미터 변화에 덜 민감하므로 필름 이송 시스템에 안전성을 향상 시키고 강인한 성능을 보인다.
4. 필름 이송 시스템에 예상치 못한 외란이 가해졌을 때 슬라이딩 제어기는 외란을 배제 하여 주어진 기준 장력을 잘 추종 한다.

## 참고 문헌

- 1 Ludwicki, J. E. and Unnikrishnan R., "Automatic control of unwind tension in finishing applications," *IECON*, 1995, pp. 774-779
- 2 Marshall, S.J.L. and Sarhadi, M., "Elastic Feed Control Systems," *IFAC Low cost Automation*, 1989, pp. 455-460
- 3 Reid, K.N., Shin, K.H. and Lin, K.C., "Variable-gain control of longitudinal tension in a web transport system," *Web Handling, ASME*, 1996, AMD Vol. 149
- 4 Ro, P.I. and Kim, H., "Four wheel steering system for vehicle handling improvement: a robust model reference control using the sliding mode," *IMechE*, 1996, 210, pp. 335-346
- 5 Shin, K.H., "Distributed control of tension in multi-span web transport systems," PhD. Dissertation, Oklahoma State University, 1991
- 6 Shin, K.H. and Hong, W.K., "Real-time Tension Control in a Multi-Stand Rolling System," *KSME International Journal*, 1998, 12(1), pp. 12-21
- 7 Shiyoa, M., Yoshtani, N. and Ueyama, T., "Noninteracting control with disturbance compensation and application to tension-looper control for hot strip mill," *IECON*, 1995, pp. 229-234
- 8 Slotine, J. E. and Li, W., "Applied Nonlinear Control," (Prentice-Hall International Editions, 1991)
- 9 Stoten, D.P. and Dye, M.G., "The application of minimal control synthesis to web tension and transport control," *IECON*, 1993, pp. 2019-2023
- 10 Yeung, M.F., Falkner, A.H. and Gergely, S., "The control of tension in textile filament winding," *J. of Mechatronics*, 1995, 5(2-3), pp. 117-131
- 11 Yun, S. C. and Han, C. S., "A Study On the Robust Control Algorithm for an Axially Moving Film," *KSME Int. J. Vol.15, No 9*