

# 이송중인 웹의 장력 및 사행제어

신기현\* · 권순오

## Control of Longitudinal Tension and Lateral Position of a Moving Web

Kee-Hyun Shin<sup>+</sup>, Soon-Oh Kwon

### Abstract

A mathematical tension model for a moving web in a multi-span web handling system was derived and validated by using a simulator which includes unwinder, driven roller, winder, load cells, controllers, etc. A tension controller was designed to compensate tension disturbances generated by velocity changes of the unwinder and driven roller. From experimental results it was proved that the tension model properly expressed the tension behavior of a moving web for specific conditions. The distributed tension controller designed by using the pole-placement technique compensated the tension disturbances transferred from upstream tension variation. Interactions between web spans including "tension transfer phenomenon" were clearly confirmed through the study.

A mathematical model of lateral motion of a moving web was verified also by using the same experimental apparatus which includes displacement type guidance systems. And a feedforward control strategy was designed for more accurate control of the lateral motion of a moving web, which utilize a measured signal of the lateral displacement of web in a previous span and a more correctly identified mathematical model to estimate the disturbance of lateral motion from the previous span. This approach was turned out to be effective in improving the performance of the guidance system for more wide range disturbances.

**Keywords** : Web, Longitudinal tension, Lateral motion, Tension transfer, System identification, Guidance system, Feedforward control

### 1. 서론

생산속도의 증가와 고품질화에 대한 요구가 증가함에 따라 이송방향(MD)의 장력 및 폭방향(CD) 사행거동(Lateral Behavior)에 대한 보다 정밀한 제어가 요구되어 지고 있다. 본 연구에서는 연속공정 시스템에 대해 장력 및 사행거동에 관한 기존의 연구성과들에 대하여 고찰하

였다. Shin<sup>[1,2,11]</sup>에 의해 연구된 웹의 진행방향에 대한 장력모델은 장력전달 현상(Tension Transfer)을 통해 전스팬(Upstream)에서 발생한 장력의 변화가 후스팬(Downstream)에 영향을 미치게 됨을 밝힌 바 있으며, 이를 바탕으로 다중스팬에서 웹의 장력을 제어하기 위한 여러 방안들이 연구되었다.

\* 건국대학교 기계항공공학부 (Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-gu, Seoul, Korea)

· 건국대학교 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering)

웹의 사행거동에 관하여는 Shelton과 Reid<sup>[3,4,5,6]</sup>에 의해 수학적 모델이 제안되었으며, Sievers<sup>[7]</sup>등에 의해 수정된 모델들이 제안되었으며, 동적거동의 해석이 이루어져 왔다.

건국대학교에서는 이와 같은 선행된 연구결과들을 바탕으로 웹의 장력거동 및 사행거동에 대한 실험적 검증과 제어를 위한 연구를 진행해 오고 있다.

본 논문에서는 이전 스펠에서 발생하는 사행외란을 보다 적극적으로 보상하기 위한 전향보상 제어기(Feedforward Controller)를 설계하여 기존의 되먹임 구조를 갖는 PI 제어기의 사행제어 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 주어진 운전조건에 대한 모델규명(Identification)을 통해 실험적인 모델을 구하고, 이를 이용하여 사행 외란을 예측하도록 하였다. 예측된 사행외란으로부터 전향보상 제어기를 구성하고, 이를 가이더 시스템의 제어 신호로 활용함으로써, 보다 적극적으로 외란을 극복하도록 하였으며, 그 성능을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 웹의 장력특성 해석

#### 2.1.1 장력 모델

Fig. 1과 같이 롤러에 의해 구분된 한 스펠 내의 소재를 검사체적(control volume)으로 정의하고 질량보존의 법칙(Law of Mass conservation)을 적용하면, 식(1)과 같다.

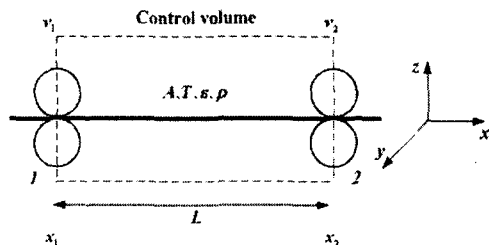


Fig. 1 Control volume of a single web span

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left[ \int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t) A(x, t) dx \right] \\ & = \rho_1(t) A_1(t) v_1(t) - \rho_2(t) A_2(t) v_2(t) \end{aligned} \quad (1)$$

위의 식(1)을 perturbation method를 이용하여 선형화(Linearization)하고, 소재의 장력(Tension)과 변형률(Strain)의 관계를 이용하여 정리하면, 식(2)와 같은 단일 스펠에서 웹의 장력모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [T_2(t)] &= -\frac{v_2 0}{L} T_2(t) + \frac{v_1 0}{L} T_1(t) \\ &+ \frac{AE}{L} (V_2(t) - V_1(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 장력  $T_2$ 는 스펠의 입출측단에서의 소재의 이송속도의 차( $V_2(t) - V_1(t)$ )와 이전스팬의 장력  $T_1(t)$ 에 의해 직접적인 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 이전스팬의 장력의 변화가 다음 스펠의 장력변화에 직접적인 영향을 미치는 현상을 장력전달(Tension Transfer) 현상이라 한다.

Fig. 1에서 구동롤러에 인가되는 토크와 소재의 이송속도의 관계는 다음의 식(3)과 같다.

$$J_2 \dot{V}_2 = -B_2 V_2 + R_2^2 (T_2 - T_1) + R_2 K_2 U_2 \quad (3)$$

위 식에서  $J$ ,  $B$ ,  $R$ ,  $K$ 는 각각 롤러의 관성모멘트, 베어링 마찰계수, 롤러의 반경, 모터의 토크 상수를 의미한다. 식(2)와 식(3)을 각 스펠에 대해 적용하면 다중스팬에 대한 웹의 장력거동을 나타내는 모델을 얻을 수 있다.

#### 2.1.2 모델 검증 및 장력제어

2.1.1에서 얻은 장력 및 속도모델을 이용하여, 다중스팬 웹 이송시스템에서 운전조건에 따라 시뮬레이션 및 실험을 통해 모델의 타당성을 확인하고, 각 구동롤러에 의해

독립적으로 구성되는 분산 PID 제어기를 이용한 장력제어 시스템을 평가한다.

Shin에 의해 제안된 장력모델의 실험적 검증을 위해 Fig. 2와 같은 2중스팬 웹 이송 시스템을 제작하고, Fig. 3과 같이 구동롤러의 속도를 변화시킴에 따른 장력변화를 측정하였다.

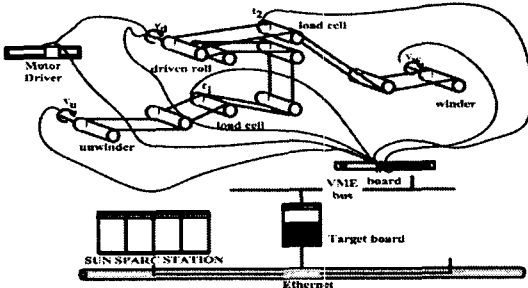


Fig. 2 Experimental apparatus of two span web transport system

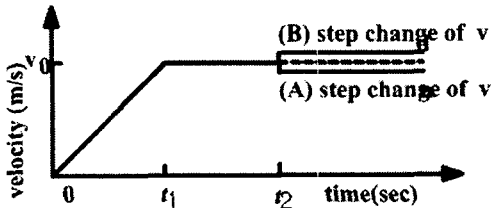


Fig. 3 Reference velocity of driven motor

모델검증을 위해 사용된 웹의 물성치는 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Web properties	
	Properties
type	SV092 (polyester)
thickness	14 $\mu\text{m}$
width	330 mm
Young's modulus	$3.54 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$
span length	first span = 2.985m second span = 2.897m

장력제어를 위해 다음의 Fig. 4과 같은 분

산 PID 제어기를 구축하고, 풀림롤(Unwinder)의 속도를 Fig. 3과 동일하게 운전하면서, 각 스패의 장력제어 결과를 측정하였다. PID 제어기는 극배치법(pole placement method)을 사용하여 설계하였다.

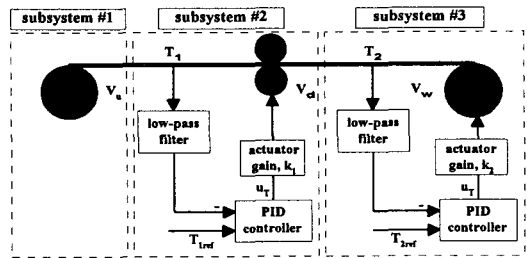


Fig. 4 Tension control system

## 2.2 웹의 사행거동 해석

### 2.2.1 사행 모델

인접한 두 롤러를 지나는 웹의 폭방향 거동에 대한 수학적 모델은 Shelton에 의해 제안된 후, 이를 바탕으로 Campbell, Shivers 등에 의해 다양한 운전조건에 대해 수정된 모델들이 제안되어져 오고 있다. Fig. 5와 같이 인접한 두 롤러를 지나는 소재의 사행 변위를  $y$ 좌표로 정의하고, 롤러의 정렬오차를  $\theta$ 로 표현할 때, 사행거동에 관한 수학적 모델은 식(4)와 같다.

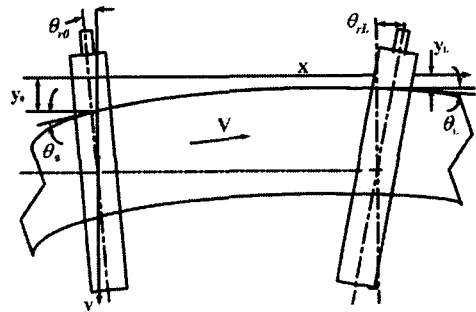


Fig. 5 Coordination of lateral motion

$$\frac{d^2 y_L}{dt^2} = v^2 \frac{f_1(KL)}{L^2} (y_0 - y_L) + \frac{v^2 f_2(KL)}{L} \theta_L + \frac{v^2 f_3(KL)}{L} \theta_0 \quad (4)$$

where

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

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

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

### 2.2.2 실험적 검증 및 사행제어

식(4)와 같은 사행모형을 다중스팬 웹 이송시스템에 적용하여 실험적으로 모델의 정확성을 확인하였다. 또한 변위형 가이드(Displacement Type Guider)를 이용하여 사행 제어 시스템을 구축하였으며, 이전스팬에서 측정된 사행변위로부터 전향제어기(Feedforward Controller)를 설계함으로써 보다 정밀한 사행위치 제어가 가능함을 확인하였다. 다음의 Fig. 6은 사행거동의 실험적 해석을 위해 구현된 모의실험장치를 나타낸다. 첫 번째 가이드(Guidar #1)는 이송중인 웹에 사행을 발생시키기 위한 것이며, 두 번째 가이드(Guidar #2)는 발생한 사행변위에 대한 제어를 담당하기 위해 사용된다.

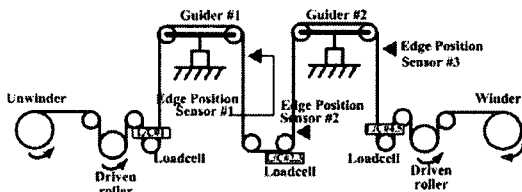


Fig. 6 Schematic diagram of guidance system

실험을 위해 사용되는 웹의 물성치는

Table 1과 동일하며, Fig. 2의 이중스팬 시스템을 확장하여 3중 스팬 시스템을 구성하였다.

사행 모델의 실험적 검증을 위해 Fig. 6의 두 번째 가이드는 고정하고, 첫 번째 가이드를 사용하여 주기적인 사행 변위를 발생시키고, 각 스팬에 설치된 측단 변위 센서(Edge Position Sensor #1,2,3)를 이용하여 이후 스팬에서의 웹의 사행거동을 측정하였다. 측정된 결과를 식(4)를 적용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

또한, 첫 번째 가이드를 이용한 사행 제어의 성능을 향상시키기 위해, 이전 스팬에서 측정된 사행변위를 이용하여 전향제어기(Feedforward Controller)를 설계하였다. 아래 Fig. 7은 이에 대한 블록선도를 나타내고 있다.  $G_p(s)$ ,  $G_c(s)$ ,  $G_d(s)$ ,  $G_e(s)$ ,  $\hat{G}_p(s)$ 는 각각 평행한 두 롤사이의 웹의 동역학 모델, 제어기, 가이드 모델, 모델규명에 의한 웹 동역학 모델을 의미한다.

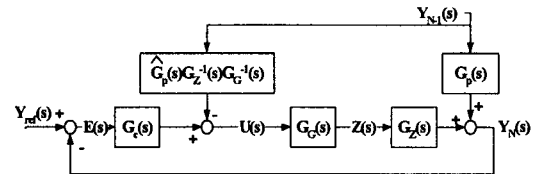


Fig. 7 Block diagram of guidance system with feedforward control

이와같은 구조의 제어시스템을 구성하기 위해서는 출력변수  $Y_N(s)$ 에 외란으로 작용하는 입력되는 이전 스팬에서의 사행변위  $Y_{N-1}(s)$ 의 영향을 나타내는  $G_p(s)$ 에 대한 정확한 모델이 필요하다. 이를 위해 ARX모형을 바탕으로 한 모델규명(System Identification)을 통해 실험적 모델을 얻었다. 구해진 실험적 사행모형을 이용하여 전향제어기를 설계한 결과, 기존의 PI제어기를 사용한 가이드 시스템의 성능을 향상시킬 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 장력모델에 대한 실험적 검증

##### 3.1.1 개루프 장력 특성

아래의 Fig. 8은 Fig. 2와 같이 구성된 이중 스펠 시스템에서 폴립롤의 속도를 Fig. 3의 (A)와 같이 감소시킨 경우에 각 스펠의 장력변화에 대한 시뮬레이션 및 실험결과를 나타낸다. 감감롤의 선속도 감소에 의해 첫 번째 스펠의 장력이 증가함과 동시에, 두 번째 스펠의 장력이 장력전달 현상에 의해 증가함을 확인할 수 있다. 이는 식(2)에서  $T_1(t)$ 의 영향이 반영된 것이다.

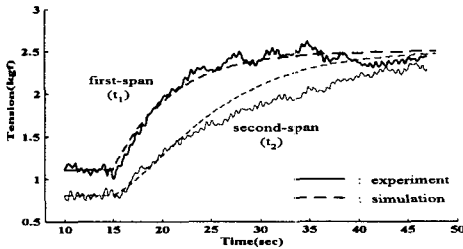


Fig. 8 Tension variation due to the speed drop of unwinder

Fig. 9는 구동롤러의 운전속도를 Fig. 3 (A)와 같이 증가시킨 경우, 첫 번째 스펠의 장력은 증가하고 두 번째 스펠의 장력은 감소한 후, 장력전달 현상에 의해 첫 번째 스펠의 장력 증가의 영향에 의해 점차 초기 값으로 수렴해 감을 확인할 수 있다.

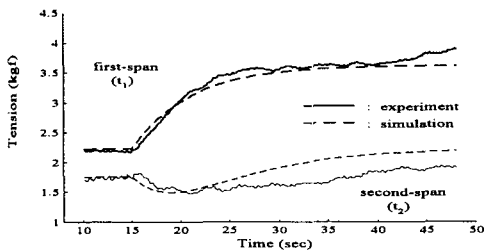


Fig. 9 Tension variation due to the speed drop of driven roller

#### 3.2 장력제어

Fig. 4와 같이 구성된 제어 시스템에서 설계된 PID제어기를 이용한 장력은 아래 Fig. 10, 11과 같다. Fig. 8에서와 동일한 실험조건에 대해 극배치법으로 설계된 장력제어기는 폴립롤의 급격한 속도변화에 의한 장력변화를 효과적으로 감소시키고 있음을 확인할 수 있다.

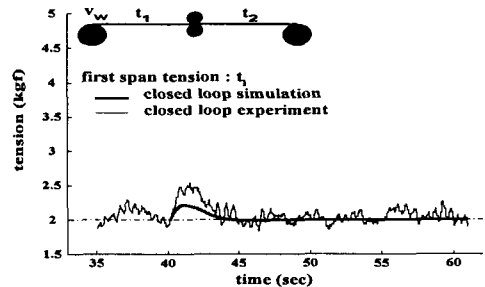


Fig. 10 Tension variation of 1<sup>st</sup> span with tension controller

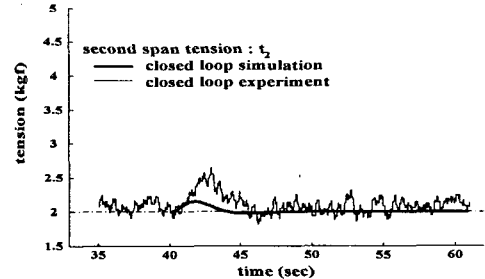


Fig. 11 Tension variation of 2<sup>st</sup> span with tension controller

#### 3.3 사행모델의 실험적 검증과 모델규명

식(4)로 표현되는 사행거동에 관한 수학적 모델의 실험적 검증을 위해 Fig. 6과 같이 변위형 가이드 시스템에서 첫 번째 가이드를 이용하여 사행변위를 발생시키고, 이후 스펠에서의 사행 변위를 측정하고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교한 결과가 Fig. 12와 같다. 기존의 모델에 근거한 시뮬레이션 결

과와 실험결과는 스펠을 지나면서 점차 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

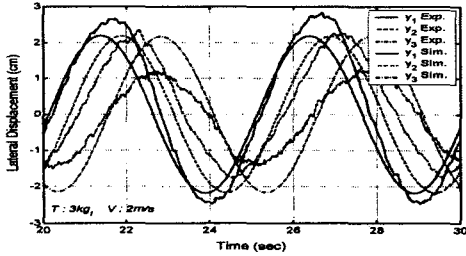


Fig. 12 Lateral displacement of a moving web

각 스펠에서 웹의 사행변위를 보다 정확하게 예측하기 위해, 모델구명을 통해 실험적 모델을 얻었다. 이를 위해 Fig. 13과 같은 M계열 신호(아래)를 가이드 시스템에 인가하고, 웹의 사행변위(위)를 측정하였으며, ARX 모델을 이용한 최소자승법에 의한 이산시간계 모델은 식(5)와 같다.

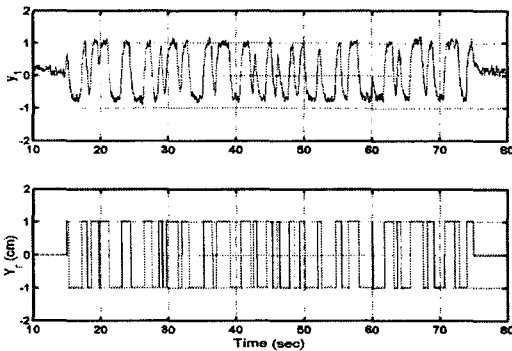


Fig. 13 Input random signal and response

$$\frac{y_3(k)}{y_2(k)} = \frac{0.04345q^{-1} - 0.0419q^{-2}}{1 - 1.872q^{-1} + 0.8738q^{-2}} \quad (5)$$

식(5)와같이 구해진 실험적 모델을 이용하여 Fig. 12와 동일한 조건에 대한 사행변위를 도기한 결과를 Fig. 14에 나타내었으며, 기존의 수학적 모델에 비해 실험결과와 유

사한 결과를 얻을 수 있었다.

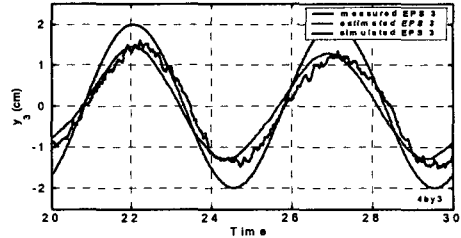


Fig. 14 Compare identified and mathematical model

### 3.4 전향보상 제어를 이용한 사행제어

기존의 가이드 시스템의 사행제어 성능을 향상시키기 위해, 식(5)에서 구한 실험적 모델을 이용하여, Fig. 7과 같은 전향보상 제어를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 제어 성능을 평가하였다. 다음의 Fig. 15는 각각 PI제어를 이용한 기존의 가이드 제어시스템과 전향보상기를 이용한 제어 시스템을 이용한 사행제어의 결과를 비교한 것이다.

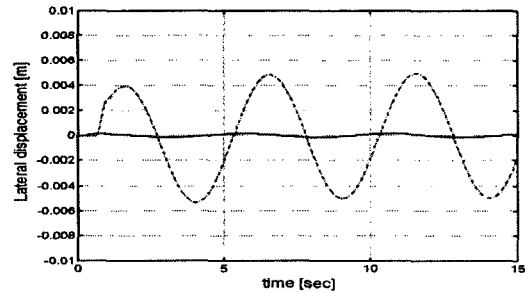


Fig. 15 Lateral displacement with PI controller and feedforward controller

전향보상 제어기는 측정이 가능한 외란에 대해 간단하면서도, 효과적으로 외란을 제거할 수 있는 구조로서 시스템의 안정성에 영향을 미치지 않는 특성을 가진다.

## 4. 결론

본 논문에서는 다중 스펀 웹 이송시스템에서 웹의 이송방향 장력거동과 폭방향 사행거동에 관한 수학적 모델을 고찰하였다. 모델의 실험적 검증을 위해 모의 실험장치를 제작하여 장력 및 사행거동에 관한 수학적 모델의 정확성을 확인하였다. 이를 통해 이송방향으로의 장력전달 현상을 확인할 수 있었으며, 사행모델에 대해서는 스펀을 지나면서 수학적 모델과 실험장치의 오차가 커짐을 확인 할 수 있었다.

인접한 스펀에서의 외란에 의한 장력변화를 극복하기 위한 장력제어기를 설계하고 이를 구현함으로써, 각 스펀의 장력을 독립적으로 제어할 수 있었다. 또한 웹의 사행변위를 제어하기 위한 기존의 가이드 시스템의 제어 한계점을 극복하고, 보다 정밀한 사행제어를 위해, 모델의 불확성을 줄이기 위한 실험적 모델을 모델규명(System Identification)을 통해 얻었으며, 이를 이용하여 전향보상 제어기를 구성함으로써 보다 정밀한 사행제어 시스템을 구현할 수 있음을 확인 하였다.

## 인용문헌

1. K. H. Shin, Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems, Ph.D. Thesis, Oklahoma State Univ, (1991)
2. K. H. Shin, K. N. Reid, S. O. Kwon, Non-interacting tension control in a multi-span web transport system, 3rd IWEB conference, Stillwater, Oklahoma, (1995)
3. J. J. Shelton, Lateral Dynamics of a moving web, Ph.D Thesis, Oklahoma State University, Ok(1968)
4. J. J. Shelton, K. N. Reid, J. Dynam. Syst. Measurement, Cont., Vol.93, pp.180~186, Sept.(1971)
5. G. E. Young, J. J. Shelton, B. Fanng, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.111, pp.497-504(1989)
6. G. E. Young, J. J. Shelton, C. Kardamilas, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.111, pp.505-510(1989)
7. L. Sievers, M. J. Balas, A. Flotow, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.33, No.6, pp.524~530, June(1988)
8. P. R. Pagilla, R. V. Dwivedula, Y. L. Zhu, S. S. Mandal, Lateral Control of a Web Using Estimated Velocity Feedback, 5th IWEB conference(1999)
9. M. P. G. J., Bestman, C. H. L. Limpens, R. Babuska, IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol.6, No.1, pp.88-102, (1998)
10. L. Ljung, System Identification Theory for the User, Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp.81~93(1999)
11. K.H. Shin, Tension Control, TAPPI Press (2000)