

웹재료의 와인딩 공정을 위한 제어기 설계

박기홍#, 허승진*

Controller Design for Web Winding Process

Kihong Park[#], Seung-Jin Heo^{*}

ABSTRACT

In a winding process, important control specifications include regulation of web tension and velocity. In this research, an adaptive controller has been developed for controlling web tension and velocity in winding processes. For the controller design, the linear quadratic regulator theory has been adopted and a gain-scheduling scheme has been incorporated. A prototype winding system has been constructed, and the controller has been implemented in a real-time PC-based environment. The performance of the closed loop system has been evaluated via simulation and experiments, and it was observed that both the web tension and velocity could be regulated within a small tolerance.

Key Words : Winding process (와인딩 공정), Web tension control (웹 장력 제어), Adaptive control (적응제어), LQR control (LQR 제어), Gain scheduling (게인 스케줄링)

기호설명

r = roll radius	ω = angular velocity
J = moment of inertia	T = web tension
L = span length	τ = input torque
β = viscous friction coefficient	
E = Young's modulus of paper	
τ_f = resistive torque by Coulomb friction	
ε = paper thickness	t_w = paper width
t_ρ = paper density	a_r = paper area
$()_u$ = unwinding roll	$()_t$ = transport roll
$()_w$ = winding roll	$()_{idle}$ = idle rolls
$()_c$ = roll core	$()_0$ = set points
$()_1$ = first span	$()_2$ = second span

1. 서론

웹(web) 제품은 산업현장 뿐 아니라 일상생활에서 흔히 볼 수 있는데 종이, 휴지, 알루미늄 포일 등이 그 예이다. 생활수준이 향상됨에 따라 웹 제품의 종류는 더욱 다양해지고 있으며 그 사용량은 빠르게 증가하고 있다. 이러한 웹 재료는 얇고, 길며, 연속적이고, 쉽게 구부러지는 특성을 지니며, 대부분의 웹 제품은 두루마리 즉 롤(roll) 모양으로 생산된다. 최종 형상이 롤이 아닌 웹 제품의 경우도 생산공정의 중간단계 어디선가는 롤 형태로 존재하게 된다. 이처럼 웹 재료를 롤 형태로 만드는 이유는 구겨짐이나 상처 없이 보관 및 운반이 편리하기 때문이다.

2002년 11월 19일 접수
 # 교신저자, 국민대학교 기계자동차공학부
 Email kpark@kookmin.ac.kr Tel. (02) 910-4689
 * 국민대학교 기계자동차공학부

커다란 롤 형태로 제조된 웹 재료를 다른 롤에 이송하는 공정을 와인딩(winding) 공정이라 한다. 와인딩 공정은 거의 모든 웹 제품의 생산공정에 포함되며 웹 제품의 품질과 생산성에 큰 영향을 미친다.¹ 와인딩 공정에서 가장 중요한 제어대상 변수는 웹의 장력과 이송속도이다. 장력을 올바르게 제어하지 않을 경우 웹 제품에는 접힘, 구김, 파단, 롤 형상의 불균일 등과 같은 품질상의 결함이 생기게 된다.² 이를 방지하려면 웹의 재질과 크기에 따라 적절한 장력을 선정하고, 와인딩 공정 동안 웹의 장력이 이 값에 유지되도록 제어하여야 한다. 와인딩 공정에서 웹의 이송속도는 웹 제품의 생산성에 영향을 준다. 웹이 고속으로 진행할수록 시스템의 진동, 웹 표면 사이의 공기의 유입 등이 고려되어야 하며, 재료의 정밀한 장력 제어가 어려워진다.

본 논문에서는 웹 와인딩 공정에서 웹의 장력과 속도를 위한 다중입출력(MIMO) 제어를 설계하였다. 이를 위해 LQR(linear quadratic regulator) 최적제어 이론을 사용하였으며, 와인딩 공정의 비선형 및 시변(time varying) 특성에 대처하기 위해 게인 스케줄링을 통한 적응제어 기법을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 웹재료로 신문지용 종이를 사용하여 시작(prototype) 와인딩 시스템을 구축하고 이를 대상으로 설계된 제어기의 성능을 시험, 평가하였다.

2. 시스템 모델

Fig. 1 은 본 연구에서 구축된 다중스팬 와인딩 시스템과 이 시스템의 변수와 파라미터들을 나타낸다.

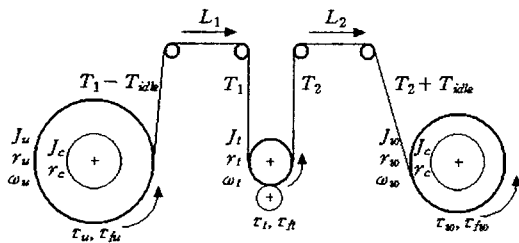


Fig. 1 Multi-span winding system

Fig. 1 에서 가장 왼쪽에 있는 롤은 풀림롤(unwinding roll)로 웹 재료를 풀어주며, 가장 오른쪽의 롤은 감김롤(winding roll)로 웹 재료를 감아준다. 가운데에 있는 롤은 전달롤(transport roll)로 웹의 전달 경로가 직선이 아니거나 너무 긴 경우 웹의 진행을 돕는 역할을 한다. 이들 세 롤은 각각 독립적으로 AC 서보모터에 의해 구동이 되며, 작업이 진행되는 동안 적절한 장력을 유지하기 위해 토크가 제어되어야 한다. Fig. 1 의 시스템에는 위에서 언급된 구동롤 이외에도 비구동롤이 있다. Fig. 1 의 윗 부분의 작은 4 개의 롤은 공회전롤(idle roll)로 원하는 웹 경로를 형성하기 위해 사용되며, 전달롤 아래에 있는 것이 접촉롤(contact roll)로 이는 웹 재료를 전달롤에 접촉시키는 역할을 하는데 이를 위해 공압에 의해 전달롤에 수직력을 가한다.

풀림롤과 감김롤에서는 작업 진행에 따라 웹 재료가 풀리고 감기 때문에 반경의 변화가 생기는데 이는 다음과 같다.

$$\dot{r}_u = -\varepsilon\omega_u / 2\pi \quad (1a)$$

$$\dot{r}_w = \varepsilon\omega_w / 2\pi \quad (1b)$$

풀림롤과 감김롤의 롤 반경이 변화함에 따라 두 롤의 회전관성이 또한 변화하는데 이는 다음과 같다.³

$$J_u = J_c + K_J(r_u^4 - r_c^4) \quad (2a)$$

$$J_w = J_c + K_J(r_w^4 - r_c^4) \quad (2b)$$

$$\text{where } K_J = t_p t_{fw} \pi / 2$$

Fig. 1 의 시스템의 운동방정식은 3 개의 구동롤에서의 회전운동량의 변화를 고려하여 구할 수 있다.³

$$\frac{d}{dt}(J_u \omega_u) = \tau_u - \tau_{fu} - \beta_u \omega_u + r_u(T_1 - T_{idle} - T_{u0}) \quad (3a)$$

$$\frac{d}{dt}(J_t \omega_t) = \tau_t - \tau_{ft} - \beta_t \omega_t + r_t(T_2 - T_1) \quad (3b)$$

$$\frac{d}{dt}(J_w \omega_w) = \tau_w - \tau_{fw} - \beta_w \omega_w + r_w(T_{w0} - T_2 - T_{idle}) \quad (3c)$$

위 식의 우변에서 첫째 항들은 각 롤의 모터에 의해 가해지는 구동토크를 나타내며, 둘째 항

들은 건조마찰(Coulomb friction) 토크를 나타내며, 셋째 항들은 점성마찰 토크를 나타낸다. 건조마찰과 점성마찰은 롤의 축과 베어링 사이의 접촉에 의해 발생한다. 식(3a)와 식(3c)의 T_{idle} 은 웹이 공회전을 지날 때 생기는 장력손실을 나타낸다. 본 연구에서는 동일한 장력손실이 스펠 1 과 2 에서 발생한다고 가정하였다. 식(3a)와 식(3c)의 T_{u0} 와 T_{w0} 는 각각 풀림롤과 감김롤에서의 초기 장력을 나타낸다.

Table 1 은 본 연구에서 구축된 다중스펠 와인딩 시스템의 파라미터 값들을 보여준다.

Table 1 Parameters of prototype winding system

parameter	value	parameter	value
ε	67×10^{-6} m	τ_{fu}	$0.132 \text{ kg m}^2 \text{ rad/s}^2$
t_p	694.0 kg/m^3	τ_{fw}	$0.232 \text{ kg m}^2 \text{ rad/s}^2$
t_w	0.4 m	β_u	$0.023 \text{ kg m}^2/\text{s}$
r_c, r_t	0.0565 m, 0.075 m	β_t	$0.036 \text{ kg m}^2/\text{s}$
J_c	0.02596 kg m^2	β_w	$0.013 \text{ kg m}^2/\text{s}$
J_t	0.1169 kg m^2		

아래 식은 식(2)를 식(3)에 대입하여 얻은 3 개의 구동롤의 회전속도에 관한 비선형 시변 미분방정식이다.

$$\dot{\omega}_u = \frac{\tau_u}{J_u} - \frac{\tau_{fu}}{J_u} - \frac{\beta_u \omega_u}{J_u} + \frac{r_u(T_1 - T_{idle} - T_{u0})}{J_u} + \frac{4\varepsilon K_f r_u^3 \omega_u^3}{J_u(2\pi)} \quad (4a)$$

$$\dot{\omega}_t = \frac{\tau_t}{J_t} - \frac{\tau_{ft}}{J_t} - \frac{\beta_t \omega_t}{J_t} + \frac{r_t(T_2 - T_1)}{J_t} \quad (4b)$$

$$\dot{\omega}_w = \frac{\tau_w}{J_w} - \frac{\tau_{fw}}{J_w} - \frac{\beta_w \omega_w}{J_w} + \frac{r_w(T_{w0} - T_2 - T_{idle})}{J_w} + \frac{4\varepsilon K_f r_w^3 \omega_w^3}{J_w(2\pi)} \quad (4c)$$

주어진 스펠에서의 웹 장력은 롤에서 가해지는 토크에 의해서 뿐 아니라 인접한 스펠의 웹 장력에 의해서도 영향을 받는데 이것을 장력전달(tension transfer) 현상이라고 부른다.^{4,5} 아래의 미분

방정식은 장력전달에 의한 웹장력의 변화를 나타낸다.

$$L_1 \dot{T}_1 = -r_t \omega_t T_1 + r_u \omega_u T_{u0} + E_1 a_{r1} (r_t \omega_t - r_u \omega_u) \quad (5a)$$

$$L_2 \dot{T}_2 = -r_w \omega_w T_2 + r_t \omega_t T_1 + E_2 a_{r2} (r_w \omega_w - r_t \omega_t) \quad (5b)$$

앞서 얻은 식들로부터 Fig. 1 의 시스템은 다음과 같은 상태방정식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (6)$$

$$\text{where } x = [r_u r_w \omega_u \omega_t \omega_w T_1 T_2]^T, u = [\tau_u \tau_t \tau_w \tau_{fu} \tau_{fw}]^T$$

위 식에서 f 는 비선형, 시변 함수로 식(1), 식(4), 식(5)를 포함하며, x 는 상태변수, u 는 입력변수를 나타낸다.

3. 제어기 설계

3.1 모델 선형화

본 절에서는 2 장에서 유도된 와인딩 시스템 모델에 선형 제어이론을 적용하기 위해서 수행된 모델의 선형화 과정을 설명한다.

식(4a)의 우변을 보면, 풀림롤 각속도 ω_u 의 선형항과 비선형항이 각각 3 번째와 5 번째 항에 있는 것을 볼 수 있다. 먼저 풀림롤의 반경은 초기 최대 반경 0.18m 에서 시작해서 웹이 완전히 풀렸을 때 최소 반경 0.057m 까지 변화한다. 또한 본 연구에서는 웹의 이송속도를 50cm/s 로 제어하고자 하는데, 이 경우 풀림롤의 각속도는 대략 초기에 2 rad/s 에서 시작해서 5 rad/s 까지 변화하는 것을 볼 수 있다. 이를 바탕으로, 식(4a)의 3 번째 항과 5 번째 항의 크기를 비교하면, 5 번째 항의 크기가 3 번째항의 0.4~2%의 범위에 오는 것을 알 수 있다. 같은 방법으로 식(4c)의 우변에 있는 감김롤 각속도의 선형항과 비선형항의 크기를 비교하면, 후자가 전자의 2.5~7.5%의 범위에 오는 것을 알 수 있다. 이러한 관찰을 바탕으로 본 연구에서는 식(4a)와 식(4c)의 마지막 비선형항들을 무시하였다.

식(4)의 τ_{fu} , τ_{fw} , τ_{fw} 는 롤 베어링 부분에서 발생하는 건조 마찰력을 나타낸다. 이들 항은 외란입력을 나타내는데, 이들 항을 추후에 페루프 시스템의 방정식에 추가한다는 전제로부터 현재의

운동방정식으로부터 제외시킬 수 있다.

식(4)의 플립롤과 감김롤의 반경은 시간에 따라 변화하지만, 그 변화는 매우 천천히 일어난다. 이는 롤의 각속도가 5 rad/s 인 경우 식(1)로부터 롤의 반경 변화율이 초당 0.1 mm 이하가 되는 것으로부터 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 이들 두 반경을 상수로 가정하고 모델을 선형화하였다. 단, 이들 두 반경을 각각 하나의 값에만 고정시키고 제어기를 설계할 경우, 제어기의 안정성과 강인성에 문제가 생길 수 있으므로, 전체 와인딩 과정 동안 변화하는 반경의 범위를 5 구간으로 구분하고 각 구간 별로 반경 값을 다르게 할당하며 이에 따라 각 구간 별로 제어 게인이 다르게 설정되도록 하였다.

위와 같은 방법으로 식(6)에 있는 비선형 시스템 방정식은 주어진 평형 조건에 대해 다음과 같이 선형화될 수 있다.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \tag{7a}$$

$$\Delta y = C \Delta x \tag{7b}$$

where $\Delta x = [\Delta \omega_w, \Delta \omega, \Delta \omega_w, \Delta T_1, \Delta T_2]^T$

$$\Delta u = [\Delta \tau_w, \Delta \tau, \Delta \tau_w]^T \quad \Delta y = [\Delta \omega, \Delta T_1, \Delta T_2]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\beta_w}{J_w} & 0 & 0 & \frac{r_{w0}}{J_w} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_l}{J_l} & 0 & -\frac{r_l}{J_l} & \frac{r_l}{J_l} \\ 0 & 0 & -\frac{\beta_w}{J_w} & 0 & -\frac{r_{w0}}{J_w} \\ \frac{r_{w0}T_{w0} - Eaq_w}{L_1} & -\frac{r_lT_{l0} + Eaq_l}{L_1} & 0 & -\frac{r_l\omega_{l0}}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{r_lT_{l0} - Eaq_l}{L_2} & \frac{r_{w0}T_{w0} + Eaq_{w0}}{L_2} & \frac{r_l\omega_{l0}}{L_2} & -\frac{r_{w0}\omega_{w0}}{L_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/J_w & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_l & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_w \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 LQR 제어 이론

본 연구에서는 와인딩 시스템의 웹의 장력과 속도를 제어하기 위해 LQR(linear quadratic regulator) 이론을 사용하였다. 이를 위해 다음과

같은 성능지수를 정의하였다.

$$PI = \int_{t=0}^{\infty} [\Delta x^T Q \Delta x + \Delta u^T R \Delta u] dt \tag{8}$$

식(8)에서 Q는 양의 한정성을 가지는 행렬이며, R은 양의 반한정성을 가지는 행렬이다. 주어진 플랜트가 가제어성(controllability)을 만족하는 경우, 위의 성능지수를 최소화하는 정상상태의 제어기가 존재하며, 그 식은 식(9)와 같다. 식(7)에 주어진 본 연구의 플랜트는 가제어성을 만족한다.

$$\Delta u = -K \Delta x \tag{9}$$

식(9)에서 K는 게인 행렬로 대수 Riccati 방정식을 풀어서 구할 수 있다. 상태 피드백 제어의 장점은 상태방정식 형태의 시스템 모델을 구하고 나면 손쉽게 다중 입출력 제어를 구현할 수 있다는 것이다. LQR 제어이론은 서로 상충되는 제어 목표를 달성하고자 할 때 게인을 얻기에 유용한 방법이다. 본 연구의 제어 목표는 웹의 장력과 속도를 동시에 제어하는 것으로 웹의 속도가 빨라질수록 장력을 제어하는 것이 어렵게 되기 때문에 이 두 가지는 서로 상충되는 성질을 지닌다. 반면, LQR 방법은 모델의 정확성에 많은 영향을 받는다. 특히 본 연구의 시스템과 같이 시변, 비선형 특성을 가지는 경우, 적응 제어 기법을 함께 사용하는 것이 필요하다.

3.3 피드포워드 제어

식(9)의 제어기는 웹의 장력과 속도에 대해 조정(regulation) 제어를 수행한다. 와인딩 공정 작업의 대부분의 시간 동안 웹의 장력과 속도는 원하는 고정값에 유지되도록 제어되어야 한다. 그러나 때때로 웹의 장력과 속도는 시간에 대해 변하는 목표값을 추종해야 한다. 시동구간이 한 예이다. 이 때 웹은 정지상태에서 증가하는 목표 속도를 추종해야 한다. 또한 제어기가 추종 성능을 가지는 것은 대상 시스템이 시변 성질을 가질 때 중요한데, 그 이유는 시변 시스템에 식(9)와 같은 제어 로직을 적용하는 것은 시불변 시스템에서 조정 목표치를 계속해서 변화시키는 것과 유사하기 때문이다.⁶

추종 제어는 상태변수 피드백 제어에 피드포워드 제어를 결합함으로써 구현할 수 있으며, 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$u = u_0 - K(x - x_0) + \tau_f \quad (10)$$

피드포워드 제어기는 사용자로부터 받은 목표 출력값 y_d 로부터, 이 값을 정상상태에서 낼 수 있는 입력 u_0 를 계산한 다음, 이를 피드백 제어 입력에 더하여 최종 제어 입력을 계산한다. 식(10)에서 τ_f 는 롤 베어링 부분에서 발생하는 건조 마찰력을 위한 항으로, 모델의 선형화 단계에서 건조 마찰력 항들이 제외되었기 때문에 제어기에 추가되어 이들 마찰력에 대한 보상작용을 해주게 된다.

Fig. 2는 전체 페루프 시스템에 대한 블록 선도를 나타낸다.

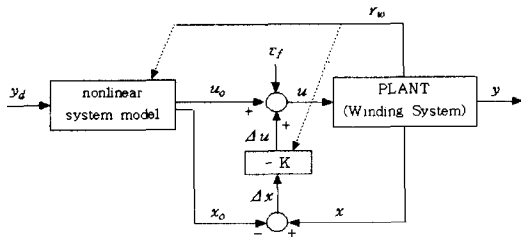


Fig. 2 Block diagram of the closed loop system

3.4 게인 스케줄링

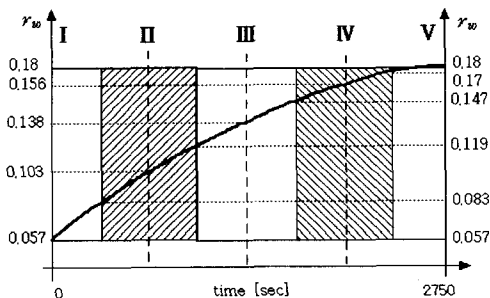


Fig. 3 Change of winding roll radius and switching ranges for adaptive control

Fig. 3은 웹의 이송속도가 50 cm/s로 일정할 때 감김롤의 반경이 시간이 지남에 따라 어떻게 변화

하는지를 보여준다. 풀림롤의 반경은 이와 대칭적으로 변화한다.

식(7)은 제어기 설계를 위해 사용되는 시스템의 선형 모델이다. 이 모델 속에는 감김롤과 풀림롤의 반경이 포함되는데, 이들 두 값은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 시간에 대해 변화한다. 반경으로 인해 생기는 시스템의 시변 특성을 고려하기 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 반경의 범위를 5구간으로 구분하였다. 각 구간 별로 감김롤과 풀림롤의 기준반경을 정하고, 이들을 식(7)의 A와 B 행렬 속의 감김롤과 풀림롤의 기준반경 값으로 사용하였다. 따라서 시스템의 선형 모델은 각 구간 별로 다르게 된다.

본 연구에서는 게인 스케줄링 기법을 도입하여, 웹의 장력과 속도가, 변화하는 롤 반경에 따라 적응식으로 제어되도록 하였다. 즉, 각 구간 별로 자신이 가지고 있는 선형 시스템 모델을 바탕으로 최적의 게인을 미리 계산하고, 와인딩 공정이 진행되는 동안 롤 반경을 측정하여 현재 롤 반경이 속하는 구간을 판단하고, 이에 따라 제어기 게인이 변화되도록 하였다. 게인 스케줄링은 스케줄링 대상 변수가 짧은 시간 동안 많이 변화하지 않는 시스템에 적합한 기법으로, 본 연구의 스케줄링 변수인 롤 반경은, Fig. 3에서 보는 바와 같이 시간적으로 느리게 변화하며 또한 그 특성상 급격한 변화를 보일 수 없다.

각 구간의 제어기 게인은 그 구간의 가운데에 해당하는 롤 반경을 기준으로 계산되었으며, 단, 첫째와 마지막 구간에서는 각각 최소 및 최대 반경을 기준으로 제어기 게인을 계산하였다. 게인이 바뀌는 지점 부근에서 롤 반경의 측정값의 노이즈로 인해 게인이 자주 바뀌는 현상을 방지하기 위해, 게인이 역 방향으로 바뀌지 못하도록 하였다. 식(11)은 5 구간에서의 제어기 게인값을 나타낸다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0.7055 & -0.1537 & -0.0545 & -0.0001 & -0.0005 \\ -0.6300 & 0.5161 & -0.0671 & 0.0008 & 0.0005 \\ -1.0056 & -0.3020 & 0.7007 & -0.0011 & 0.0020 \end{bmatrix} \quad (11a)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 1.0289 & -0.2602 & -0.1575 & -0.0002 & -0.0004 \\ -0.7307 & 0.6605 & -0.1521 & 0.0006 & 0.0002 \\ -0.7361 & -0.2532 & 1.0228 & -0.0002 & 0.0008 \end{bmatrix} \quad (11b)$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} 1.1381 & -0.3327 & -0.3878 & -0.0005 & -0.0001 \\ -0.3893 & 0.7096 & -0.4913 & 0.0002 & -0.0003 \\ -0.2990 & -0.3238 & 1.1294 & 0.0002 & 0.0004 \end{bmatrix} \quad (11c)$$

$$K_4 = \begin{bmatrix} 0.9527 & -0.2525 & -0.7142 & -0.0010 & 0.0004 \\ -0.1269 & 0.6099 & -0.6603 & -0.0002 & -0.0006 \\ -0.1400 & -0.2577 & 0.9775 & 0.0004 & 0.0002 \end{bmatrix} \quad (11d)$$

$$K_5 = \begin{bmatrix} 0.7007 & -0.2803 & -1.0181 & -0.0019 & 0.0011 \\ -0.0634 & 0.5103 & -0.6371 & -0.0005 & -0.0008 \\ -0.0562 & -0.1554 & 0.7088 & 0.0005 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (11e)$$

Fig. 4 는 게인이 바뀌는 5 점의 롤 반경에서 구한 식(7)의 시스템 극점의 위치를 보여준다. 이 그림으로부터 롤 반경의 변화에 따른 시스템의 특성이 변화를 볼 수 있다. 감김롤을 기준으로 보았을 때 초기에 웹이 롤에 감김에 따라 감쇠특성이 약해졌다가, 어느 정도가 지나면 다시 강해지는 것을 볼 수 있다. 하지만 기본적으로 감쇠특성이 매우 약하기 때문에 이러한 차이는 매우 작은 것임을 알 수 있다. 또한 감쇠주파수가 롤 반경에 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있다.

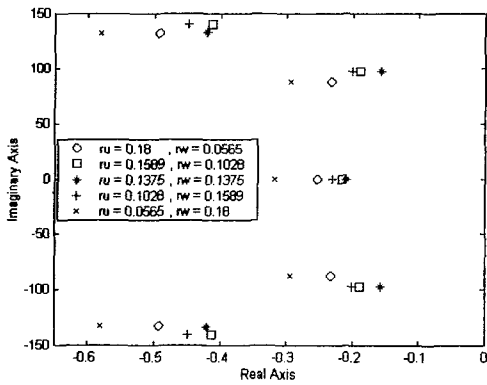


Fig. 4 Root locus of the open loop system

Fig. 5 는 Fig. 4 와 동일한 5 점의 롤 반경에서 구한 페루프 시스템의 극점의 위치를 보여준다. 페루프 시스템은 와인딩 시스템과 제어기로 이루어진다. 플랜트 시스템도 시변이며 제어기 또한 적응식으로 시간에 대해 변화한다. 이 그림으로부터, 제어기를 사용함으로써, 시스템의 안정화 여유(stability margin)가 크게 늘어났으며, 따라서 감쇠특성도 좋아진 것을 볼 수 있다. 롤 반경의 변화에 따른 시스템 특성의 변화는 Fig. 4 의 시스템

의 경우와 비슷한 것을 알 수 있다. 즉, 와인딩 공정이 진행됨에 따라 감쇠특성이 약해졌다가, 어느 정도가 지나면 다시 강해지며, 감쇠주파수는 롤 반경에 거의 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다.

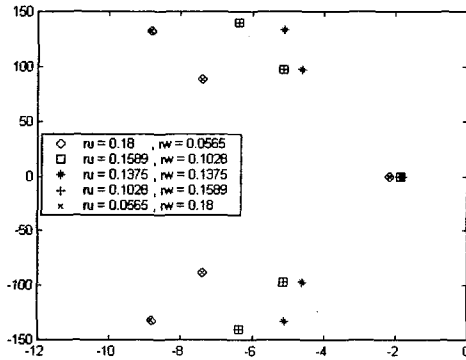


Fig. 5 Root locus of the closed loop system with gain scheduling

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

설계된 제어기의 성능을 시험하기 위해 본 연구에서는 수치 시뮬레이션과 함께 실험을 수행하였다. 실험을 위해, 설계된 제어기를 PC 상에서 구현하였으며, 이를 통해 본 연구에서 제작한 와인딩 시스템을 실시간 구동하였다. 웹 재료로는 신문지용 종이를 사용하였으며, 와인딩 공정은 감김롤에 종이가 전혀 감겨져 있지 않은 상태에서 시작되도록 하였다. PC 로 구현된 제어기는 5ms 의 주기로 외부와 데이터를 주고 받도록 설정하였다.

Fig. 6 은 본 연구의 페루프 시스템의 하드웨어 구조를 보여주며, Photo 1 은 본 연구에서 제작된 와인딩 시스템을 보여준다. 먼저 웹의 장력은 스펠 1 과 스펠 2 에서 각각 측정하였다. 이를 위해 각 스펠에서 중앙쪽에 위치한 두 개의 공회전롤에 대해, 각 공회전롤을 지지하는 두 개의 롤 베어링 아래 로드셀을 부착하고 여기서 측정된 힘을 평균하여 이를 장력으로 환산하였다. 롤의 반경은 감김롤의 반경만을 포텐서미터를 사용하여 측정하였다. 세 개의 구동롤들의 각속도는 타코미터를 이용하여 측정하였다. 제어를 위해서 세 개의 구동롤을 구동하는 AC 서보모터의 토크를 제어하였다. 인터페이스를 위해서는 미국 National Instruments

사의 A/D, D/A 보드를 사용하였다.

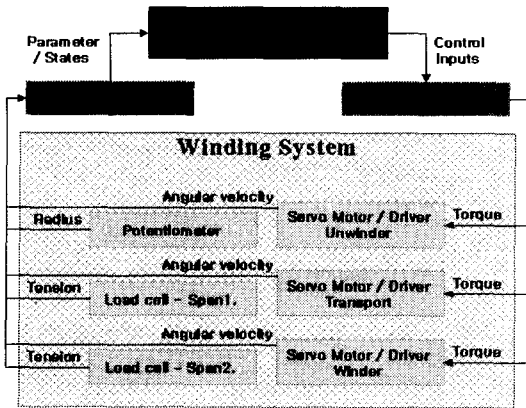


Fig. 6 Schematics of closed-loop winding system

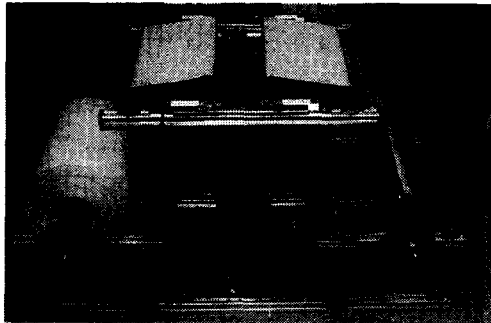


Photo 1 Prototype winding system

Fig. 7 과 Fig. 8 은 제어기를 장착하지 않은 와인딩 시스템을 대상으로 한 시뮬레이션과 실험 결과를 보여준다. Fig. 7 은 폴림롤, 전달롤, 감김롤에 각각 $-2.4, 0.4, 0.9 \text{ Nm}$ 의 입력토크를 주었을 때 스펠 1 과 스펠 2 의 장력의 변화를 보여준다. Fig. 7 에서 직선으로 수렴하는 두 점선이 시뮬레이션 결과이며, 계측 잡음을 보이는 두 실선이 실험 결과이다. Fig. 8 은 Fig. 7 과 동일한 조건일 때 세 롤의 각속도의 변화를 보여준다. Fig. 8 에서 점선으로 나타난 세 곡선이 시뮬레이션 결과이며, 계측 잡음을 보이는 세 실선이 실험 결과이다.

앞서 Fig. 4 의 시스템 극점의 위치로부터 예측된 것과 같이, 장력의 과도응답이 매우 큰 진동특성을 보이는 것을 알 수 있다. 두 그림에서 모두 실험과 시뮬레이션 결과가 잘 맞는 것을 볼 수 있으며, 이로부터 앞서 본 와인딩 시스템의 수학적

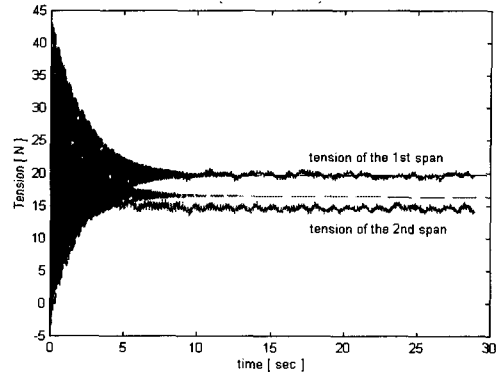


Fig. 7 Simulation & test results for open loop system 1

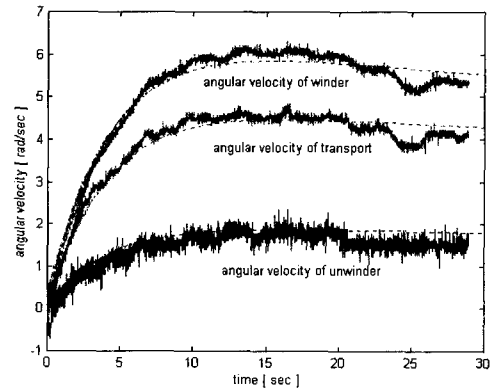


Fig. 8 Simulation & test results for open loop system 2

모델이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 본 연구의 와인딩 시스템을 피드백 제어 없이 3.3 절의 피드포워드 제어기만을 장착하여 구동했을 때, 약 27 분 동안의 스펠 1 과 스펠 2 의 장력의 변화와 세 구동롤의 각속도의 변화를 보여준다. 그림으로부터 웹의 장력이 일정한 목표값에 유지되지 못하고, 시간이 지남에 따라 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 전달롤의 각속도도 목표값으로 준 6.67 rad/s 에 유지되지 못하고 이 값 아래로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11 과 Fig. 12 는 와인딩 시스템에 피드포워드 제어기와 상태 피드백 제어기가 장착된 페루프 시스템의 실험 결과를 보여준다. 이 그림들로부터 스펠 1 과 스펠 2 의 웹 장력과 전달롤의 각속도가 목표값에 잘 제어가 되는 것을 볼 수 있다. 실험은 약 27 분 동안 수행이 되었는데, 이 시간 동안 롤의 반경은 Fig. 3 의 처음 3 구간을 통과하였는데

1 구간에서 2 구간으로의 진입은 350 초에서 발생하였으며, 2 구간에서 3 구간으로의 진입은 800 초에서 발생하였다. Fig. 11 과 Fig. 12 를 보면, 이러한 변화가 있는 곳에서 응답이 영향을 받으며, 새로운 게인이 사용됨에 따라, 제어성능이 향상되는 것을 볼 수 있다.

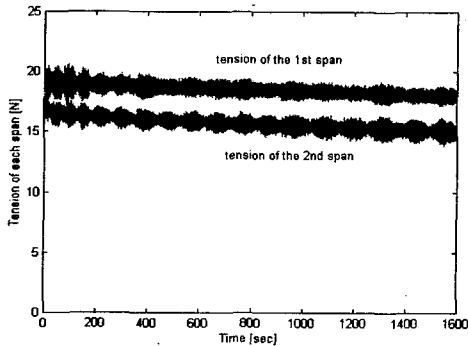


Fig. 9 Test results for f-f. controlled system 1

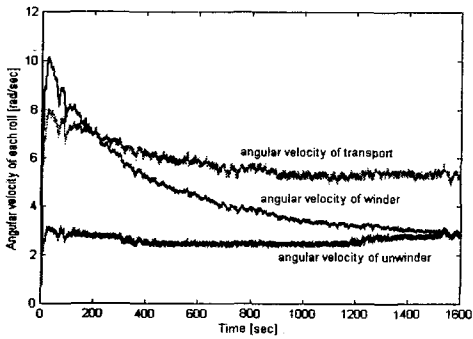


Fig. 10 Test results for f-f. controlled system 2

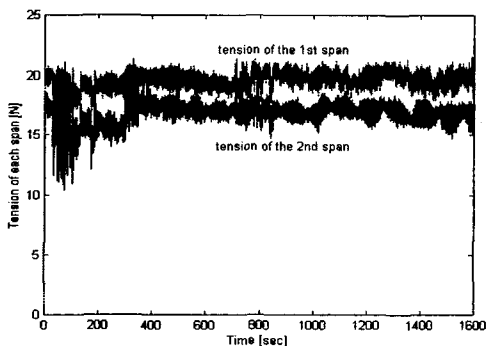


Fig. 11 Test results for closed loop system 1

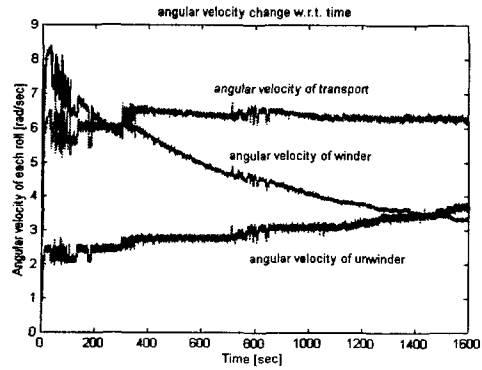


Fig. 12 Test results for closed loop system 2

5. 결론

본 연구에서는 웹 재료의 와인딩 공정을 위한 제어기를 설계하였다. 이 제어기는 적응제어 방식의 다중입력 다중출력 제어기로 웹의 장력과 이송속도를 제어하도록 설계되었다. 제어기의 게인을 구하기 위해 LQR 이론을 사용하였으며, 비선형 시변인 시스템 특성에 대처하기 위해 게인 스케줄링의 적응제어 기법을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 설계된 제어기를 검증하기 위해 신문지 용지를 웹 재료로 하는 와인딩 공정 시스템의 하드웨어를 구축하였으며, 설계된 제어기를 PC에서 실시간으로 구현하여 와인딩 공정에 대한 제어기의 성능을 평가하였다. 실험 결과, 본 연구에서 설계된 제어기는 웹 재료의 각 스펠에서의 장력과 웹 이송속도를 적절하게 제어하는 것을 볼 수 있었다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Roisum, D. R., The Mechanics of Winding, TAPPI Press, 1994.
2. Roisum, D. R., The Mechanics of Rollers, TAPPI Press, 1996.
3. Mathur, D. and Messner, C., "Controller Development for a Prototype High-Speed Low-

- Tension Tape Transport," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 534-542, 1998.
4. Shin, K.-H., "Variable-Gain PID Control of Longitudinal Tension in a Web Transport System," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 724-730, 1995.
 5. Shin, K.-H., "Real-Time Tension Control in a Multi-Span Continuous Process System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 108-116, 1995.
 6. Franklin, G. F., Powell, J. D. and Naeini, A. E., Feedback Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley, 1994.
 7. Shamma, J. S., "Linearization and Gain-Scheduling," The Control Handbook, Vol. 1, IEEE Press, 1996.