

접압롤 및 보조롤이 있는 권취공정에서의 장력의 비선형 제어 Non-linear tension control in a winding process with a contact roll and a nip roll

신기현 (건국대), 김규태, 천성민 (건국대 대학원)

K. H. Shin (Kon-Kuk Univ.), K. T. Kim , S. M. Cheon (Graduate School, Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

The contact roll is often used to regulate the winding tension as well as the entrained air in a wound roll by adjusting the contact force to the winding roll. But the contact force generated by other rolls, like assistant nip rolls, in a winding(or roll changing) process may act as disturbance to the control of the winding tension. In this paper, the mechanism of a roll change process is analyzed. And, the behavior of the contact and the assistant nip rolls are mathematically modeled. A nonlinear PID(NPID) controller is designed to control the winding tension and to reject the effect of disturbance generated by the assistant nip roll on the winding tension variation. Computer simulation study showed that the performance of the suggested NPID controller is improved compared with that of the PID controller in controlling the winding tension and in rejecting the effect of the disturbance.

Key Words : Web (웹), Roll Change Process (권취롤 교환 공정), Contact Roll (접압롤), Nip Roll (넙롤), NPID Controller (비선형 PID 제어기), Winding Tension (권취장력)

1. 서 론

기호설명

A	소재 단면적
b	접성마찰계수
B	감쇠계수
D	롤 직경
E	소재 탄성계수
f	접압력 변화
F	마찰력
J	롤 관성모멘트
K	스프링 상수
L	스펜 길이 (롤 사이의 소재 길이)
m	질량
R	롤 반경
T	정상 상태에서부터의 장력변화
u	조작량
V	정상 상태에서부터의 속도변화
μ	접압롤과 권취롤사이 표면마찰계수
τ	구동토크 변화량

첨자

c	실린더
w	권취롤

연속적이며 잘 구부러지는 판이나 선 형태의 재료를 웹(web)이라 한다. 풀림롤에서 권취물로 웹은 연속적으로 이송되고, 이때 이송되는 웹에 가해지는 다양한 공정들로 연속공정 시스템은 이루어져 있다. 이러한 시스템에서 최종적으로 권취롤에 웹을 감는 공정을 권취공정(winding process)이라 한다. 권취롤이 만권이 되면, 일반적으로 권취공정을 정지시키지 않고 연속적으로 만권이 된 코어(core)와 새 코어를 교환하는 권취롤 교환 공정(roll change process)이 있다.

권취공정에서 접압롤은 적절한 접압력을 권취롤 상에 가함으로써 권취된 웹의 장력(WIT : Wound In Tension)조절과 권취 웹 사이로의 공기유입현상(air entrainment)을 줄일 수 있다. 또한 보조넙롤(nip roll), 커터롤(cutter roll), 벨트가이드롤(belt guide roll)은 권취롤 교환 공정에서 순차적으로 권취롤에 접함으로서 웹의 장력 유지와 웹 커팅(cutting)공정을 돕는다. 이러한 접압롤이나 보조롤이 권취롤에 접할 때 정확한 속도 동기는 어려운 문제이고, 이러한 속도 불일치로 인해 권취장력에 급격한 변화가 생김을 현장에서 관찰하였다. 이러한 속도 불일치에 의해 권취롤과 다른 보조롤 사이에

발생되는 마찰력을 고려하여 Shin^[1]의 롤의 속도모델을 확장하였다. 확장된 모델에서는 접압롤과 다른 보조롤에 의해 발생하는 토크의 변화량을 권취롤의 속도모델에 포함하였다.

웹의 장력제어와 웹 이송 시스템에 대한 연구는 Grenfell이래 꾸준히 지속되어왔다.^[1,3,4,5,6] Lin과 Shin^[6]은 권취롤의 기동 및 정지시 소재의 장력변화에 관한 연구를 하였다. 또한, 접압력과 권취된 장력(WIT)의 관계에 대한 해석^[7,8], 접압력의 동특성과 권취장력 변화에 대한 연구가 수행되어 왔다.

본 논문에서는 권취공정과 권취롤 교환 공정을 순차적으로 해석하였다. 그리고, 권취공정 초기와 말기에 접압롤이 권취롤에 붙고 떨어질 때, 접압롤에 의한 접압력을 조절함으로써 권취장력의 변화를 줄일 수 있고, 접압롤에 의해서 그 외의 보조롤에 의한 장력 변화도 조절할 수 있음을 보였다.

접압롤을 이용하여 권취장력을 제어하는 동시에, 추가로 권취롤에 접해지는 보조롤 때문에 발생하는 장력 변화를 줄이기 위한 방법으로 권취장력을 피드백(feedback)하는 비선형 PID 제어기(Nonlinear PID controller)를 설계하였다. NPID 제어기는 Xu, Y. Ma, D., and Hollerbach, J.M.^[2,9]이 제안한 비선형 PD 제어기(NPD 제어기)에 제어성능을 향상시키기 위하여 I제어기를 추가한 형태이다. 컴퓨터 시뮬레이션 연구결과 NPID 제어기의 권취장력 제어 성능이 일반적인 PID 제어기보다 우수하였다.

2. 권취롤 교환 공정

권취공정은 캐리지(carriage)와 접압롤(contact roll), 웹이 감기고 있는 코어(old core)와 새로 교환될 코어(new core), 각 코어의 보조넙롤, 코어의 교환을 돕는 터렛(turret), 그리고, 웹을 자르기 위한 커터(cutter)와 커터롤(cutter roll), 벨트가이드롤(belt guide roll)등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 권취롤 교환 공정을 포함한 권취공정 시스템의 개략도이다.

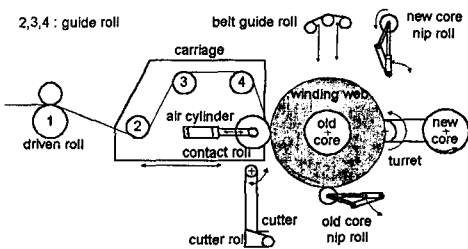


Fig. 1 권취롤 교환 공정을 포함한 권취공정 시스템

연속적인 권취롤 교환을 위한 권취롤 교환 공정의 순차적인 작동 순서는 다음과 같다. Fig. 2와 같이 접압롤은 권취초기에 권취롤에 접하여 말기까지 일정한 접압력을 권취롤에 가한다. 권취가 완료되면 Fig. 3과 같이 미리 회전하고 있던 넙롤(old core nip roll)이 권취롤에 접한다. 캐리지의 후퇴에 의해서 접압롤이 권취롤에서 떨어지고 넙롤이 접압롤을 대신해서 권취롤 교환 공정 중에 권취롤에 일정한 접압력을 가한다.

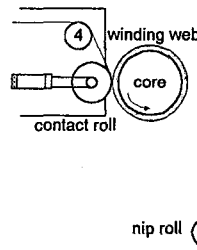


Fig. 2 접압롤의 기능

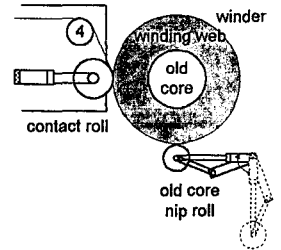


Fig. 3 넙롤의 기능

Fig. 4에서와 같이 터렛 회전이 가능하도록 캐리지가 후퇴된 후, 터렛이 회전을 시작한다. Fig. 5는 터렛이 반시계 방향으로 회전하여 권취중인 코어(old core)와 새 코어(new core)의 위치가 바뀌는 과정을 보인다.

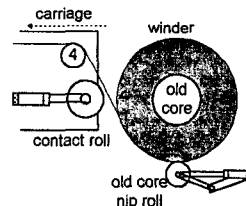


Fig. 4 캐리지 후진

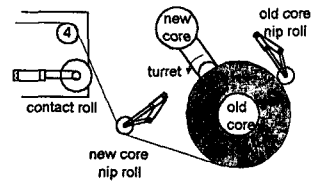


Fig. 5 터렛 회전

이때, 또 다른 넙롤(new core nip roll)은 Fig. 5에서와 같이 웹이 지나는 경로를 만들어 준다.

터렛 회전이 완료되면, 후퇴해 있던 캐리지는 전진하여 Fig. 6과 같이 접압롤이 새 코어에 접하게 되도록 한다. 그 다음에 새 코어에 웹이 감기는 것을 돕기 위해 벨트가이드롤을 Fig. 6에서와 같이 위에서 아래로 이동한다.

벨트가이드롤의 이동이 끝나면, 커터의 주행을 원활히 하기 위해 커터롤을 새 코어 근처로 상승시켜 웹의 경로를 변경시킨다. 웹의 폭방향으로 커터가 주행될 때, 웹이 잘리고, 웹은 새 코어에 다시 감기기 시작한다.

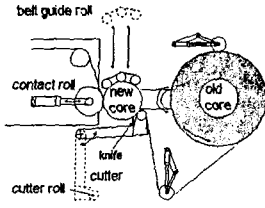


Fig. 6 커팅공정

새 코어에 권취가 시작된 후 벨트가이드롤과 커터롤은 제자리로 복귀하고, 만권된 권취롤과 님롤은 정지한다. 이같은 일련의 과정을 통해 권취롤교환공정은 이루어진다.

3. 시스템 모델

권취장력에 대한 연구를 위하여, 본 논문에서 대상으로한 권취장력 제어 시스템의 구성은 Fig. 7과 같다.

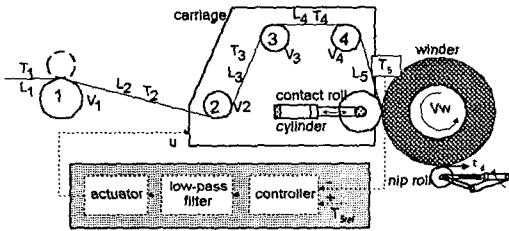


Fig. 7 권취장력 제어 시스템

Fig. 7의 캐리지와 접압롤 그리고 권취롤을 포함한 접압력 발생기구에 관한 단순화된 모델은 Fig. 8과 같고, 이로부터 유도된 수학적 모델은 식 (1)~(4)과 같다.

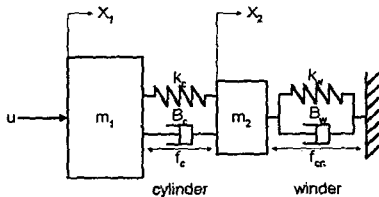


Fig. 8 접압력 발생 기구

$$m_1 \ddot{x}_1 + B_c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c(x_1 - x_2) = u \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + B_w \dot{x}_2 + k_w x_2 = f_c \quad (2)$$

$$f_c = B_c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c(x_1 - x_2) \quad (3)$$

$$f_{cn} = B_w \dot{x}_2 + k_w x_2 \quad (4)$$

Fig. 8에서 f_c 는 접압롤에 가해지는 실린더 힘이며, f_{cn} 은 접압력이다. m_1 은 캐리지, m_2 는 접압롤의 질량을 나타낸다.

Fig. 7에서 1~4번롤 구간에서 웹의 장력 모델과 각 롤들의 속도 모델은 식(5)~(11)과 같이 표현된다.^[1]

$$J_1 \dot{V}_1(t) = -b_1 V_1(t) + R_1^2(T_2(t) - T_1(t)) + R_1 \tau_1 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}[T_2(t)] = -\frac{V_{2o}}{L_2} T_2(t) + \frac{V_{1o}}{L_2} T_1(t) + \frac{AE}{L_2}(V_2(t) - V_1(t)) \quad (6)$$

$$J_2 \dot{V}_2(t) = -b_2 V_2(t) + R_2^2(T_3(t) - T_2(t)) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}[T_3(t)] = -\frac{V_{3o}}{L_3} T_3(t) + \frac{V_{2o}}{L_3} T_2(t) + \frac{AE}{L_3}(V_3(t) - V_2(t)) \quad (8)$$

$$J_3 \dot{V}_3(t) = -b_3 V_3(t) + R_3^2(T_4(t) - T_3(t)) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}[T_4(t)] = -\frac{V_{4o}}{L_4} T_4(t) + \frac{V_{3o}}{L_4} T_3(t) + \frac{AE}{L_4}(V_4(t) - V_3(t)) \quad (10)$$

$$J_4 \dot{V}_4(t) = -b_4 V_4(t) + R_4^2(T_5(t) - T_4(t)) \quad (11)$$

권취롤의 수학적 모델은 (i) 접압롤이 권취롤에 접하고 떨어질 때, (ii) 님롤이 추가로 권취롤에 접할 때로 각각 나누어 구할 수 있다. 3.1~3.2에서는 위의 두 가지 경우에 대한 각각의 수학적 모델을 구하였다.

3.1. 접압롤이 권취롤에 접하고 떨어질 때, 권취롤의 속도모델과 소재의 장력모델

접압롤의 회전속도가 권취롤의 회전속도 보다 빠를 경우, 두 롤이 접하고, 떨어질 때 접압력(f_{cn})에 비례하는 마찰력(F)이 발생한다. 이때 권취롤에 대한 자유물체도는 Fig. 9와 같다.

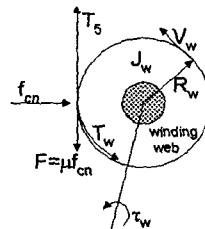


Fig. 9 권취롤의 자유물체도

접압력에 의해 권취롤로 전달되는 토크량은 마찰력과 권취롤의 반경에 의해 결정되는 값으로 $F \times R_w$ 로 표현할 수 있고, 이를 롤의 속도 모델에 추가함으로써 식 (12)와 같은 권취롤의 속도 모델을 구할 수 있다. 식 (13)은 웹의 장력 모델이다.

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_w V_w(t) + R_w^2(T_w(t) - T_5(t)) + R_w(\tau_w + FR_w) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt}[T_5(t)] = -\frac{V_{w0}}{L_5} T_5(t) + \frac{V_{40}}{L_5} T_4(t) + \frac{AE}{L_5}(V_w(t) - V_4(t)) \quad (13)$$

3.2. 님롤이 추가로 권취롤에 접할 때 권취롤의 속도 모델

Fig. 10은 권취공정 말기에 접압물이 권취롤에 접해 있을 때 추가로 님롤이 권취롤에 붙을 때를 나타낸다.

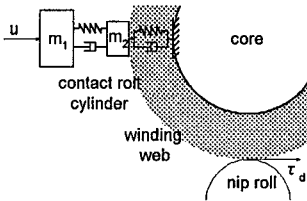


Fig. 10 접압롤과 님롤이 동시에 권취롤에 접해있는 경우에 대한 모델

님의 회전 선 속도와 권취롤의 속도가 일치하지 않은 상태에서 두 롤이 접할 경우, 권취롤의 구동토크에 변화가 있게 되고, 이로 인해 권취장력에 급격한 변화가 발생한다. 님롤에 의한 권취롤의 구동토크(τ_d) 변화를 고려하면 권취롤의 속도모델은 식 (14)와 같다.

$$J_w \dot{V}_w(t) = -b_w V_w(t) + R_w^2(T_w(t) - T_5(t)) + R_w(\tau_w + FR_w + \tau_d) \quad (14)$$

식 (1)~(4)의 접압력 발생기구에 관한 수학적 모델과 식 (5)~(14)의 장력 및 속도 모델을 사용하여 접압력에 의한 권취장력제어 문제를 연구하고자 한다.

4. 제어기 설계

Fig. 11은 접압력에 의해서 권취장력을 제어할 수 있는 권취장력 제어 시스템의 블록 다이어그램(block

diagram)을 나타낸다.

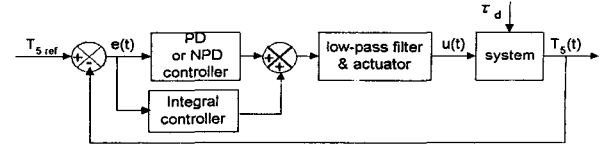


Fig.11 권취장력 제어 시스템의 블록 다이어그램

권취장력 제어를 위해 Xu, Y., Ma, D., and Hollerbach, J.M.^[2,9]이 제안한 NPD 제어기를 변형시킨 NPID(Nonlinear PID) 제어기를 설계하고 일반적인 PID 제어기와 권취장력제어 성능을 비교, 평가하였다. 설계된 NPID 제어기는 식 (15)와 같다.

$$u(t)_{NPID} = K_n e + B_n \dot{e} + K_i \int_0^t e dt \quad (15)$$

$$(\text{단, } e(t) = T_{5\text{ref}} - T_5)$$

NPID 제어기의 제어 게인(K_n , B_n)은 식 (16), (17)과 같은 함수 형태를 갖는다.

$$K_n = \frac{K_1}{1 + \beta \exp^{\alpha \text{sign}(dT_5/dt) e}} + K_0 \quad (16)$$

$$B_n = \frac{B_1}{1 + \beta \exp^{\alpha \text{sign}(dT_5/dt) e}} + B_0 \quad (17)$$

식 (16), (17)에서 K_1 , K_0 와 B_1 , B_0 는 PID 제어기의 제어이득 K 와 B 를 기준으로 하여 시스템의 안정성을 보장하는 범위 내에서 $K_0 < K < K_1$, $B_0 < B < B_1$ 의 관계를 만족하도록 결정한 값이다. 그리고, α 와 β 는 시뮬레이션 연구를 반복하여 결정한 값^[2]으로 α 는 출력과 오차의 민감도(sensitivity)에 관계하고, β 는 K_1 , B_1 의 크기(weighting)를 결정한다.

실제 시스템에서의 고주파 노이즈를 제거하기 위하여 4Hz의 저주파 통과 필터를 설계, 사용하였다.

5. 시뮬레이션

권취롤 교환 공정 중에서 접압물이 붙는 순간과 님롤이 붙는 순간, 그리고 다시 접압물이 떨어지는 순간에 장력변화가 심하게 일어난다. 이러한 경우에 대한 NPID 제어기의 권취장력제어 성능을 일반적인 PID 제어기와 비교를 통해 알아본다.

Table 1은 사용된 제어기의 제어 이득값을 나타낸다. 그리고, 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 각 값들과 조건들은 현장에서 사용되는 전형적인 값들로서 Table 2와 같다.

Table 1 제어 이득값

PID	NPID		
$K=2.2$	$K_I = 5$	$B_I = 6$	$\alpha = 1$
$B=0.2$	$K_o = 2$	$B_o = 0.2$	$\beta = 100$
$K_r=20$	$K_r=20$		

Table 2 시뮬레이션에 사용된 조건

D_1	0.3 m	A	$5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
D_2, D_3, D_4	0.2 m	E	$2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
L_1	0.45 m	V_o	6.67 m/s
L_2	1.15 m	b_w	0.1
L_3	0.39 m	μ	0.3
L_4	0.4 m	m_1	500 kg
L_5	0.4 m	m_2	100 kg
J_1	$7.7106 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	K_b	100000 N/m
J_2, J_3, J_4	$1.8933 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	B_o	2000 N/ms^{-1}

권취롤의 강성계수(K_w)와 감쇠계수(B_w)를 가정하여 권취롤의 상태를 표현할 수 있다. 접압롤이 권취롤에 접하는 권취초기 권취롤의 상태는 $K_w=1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$ 로 가정하였다. 님롤이 권취롤에 붙고 접압롤이 권취롤에서 떨어지는 권취말기는 권취된 웹의 양을 고려하여, $K_w=0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=1300 \text{ N/ms}^{-1}$ 로 가정하고, 권취롤의 질량증가는 질량관성 모멘트의 변화($\Delta J_w=2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)로 나타내었다.

Fig. 12는 권취초기 접압롤이 권취롤에 접할 경우 NPID 제어기와 PID 제어기의 권취장력 제어성능을 보여준다.

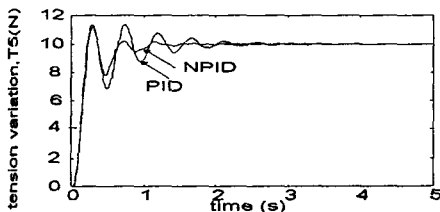


Fig. 12 접압롤이 권취롤에 접할 때 권취장력 ($K_w=1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=700 \text{ N/ms}^{-1}$)

권취초기 권취롤에 접압롤이 접할 때, 기준 권취장력($T_{\text{set}}=10\text{N}$)으로 수렴되는 권취장력은 NPID 제어기에 의하여 제어될 경우, PID 제어기에 의해 제어될 경우에 비해 같은 상승시간을 가지면서도 정상상태 수렴시간이 약 2초 정도 빠르다.

님롤이 권취롤에 접하고, 접압롤이 권취롤에서 떨어지는 현상은 권취말기에 일어난다. 님롤이 권취롤에 접할 때 1N의 접압력이 권취롤에 가해지는 것으

로 가정하고, 그때 발생하는 권취장력 변화를 접압롤이 조절할 수 있음을 Fig. 13을 통해 알 수 있다.

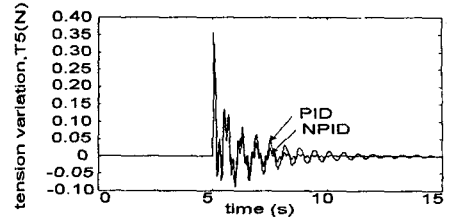


Fig. 13 님롤이 권취롤에 접할 때의 장력변화 ($K_w=0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=1300 \text{ N/ms}^{-1}$, $\Delta J_w=2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)

Fig. 13을 통해 님롤이 권취롤에 접할 때 권취장력이 급격히 변화됨을 알 수 있다. 또한 이러한 님롤에 의한 장력변화를 접압롤의 접압력 제어에 의해서 줄일 수 있음을 알 수 있다. 특히, NPID 제어기는 일반적인 PID 제어기보다 오버슈트(over shoot)와 수렴속도 면에서 향상된 제어 성능을 가졌다.

Fig. 14는 접압롤이 권취롤에서 떨어질 때의 권취장력 변화이다.

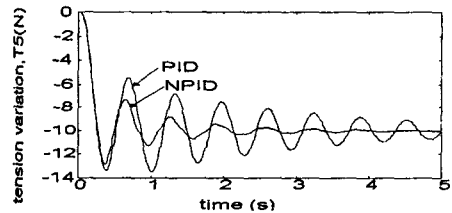


Fig. 14 접압롤이 권취롤에서 떨어질 때의 권취장력 변화 ($K_w=0.5 \times 10^5 \text{ N/m}$, $B_w=1300 \text{ N/ms}^{-1}$, $\Delta J_w=2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)

접압롤이 권취롤에서 떨어질 경우에도 출력의 정상상태 수렴 속도 면에서 NPID 제어기의 권취장력 제어 성능이 PID 제어기보다 우수하였다.

6. 결 론

권취공정 중에 접압롤이 권취롤에 붙고 떨어질 때, 권취롤교환 공정 중에 님롤이 권취롤에 붙고 떨어질 때, 장력 변화가 급격함을 현장에서 관찰한 바 있다. 본 논문에서는 권취롤 교환 공정을 비롯한 권취공정 전반에 대한 이해를 바탕으로 권취공정 중에 발생하는 장력의 변화를 최소화할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 따라서, 접압롤과 권취롤 그리

고, 캐리지를 포함한 접압력 발생 기구에 관한 수학적 모델을 구하고, 각 롤들이 권취롤에 전달하는 토크량을 표현할 수 있도록 Shin^[1]의 소재의 장력모델, 활의 속도모델을 확장하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 연구를 통하여 접압롤이 권취롤에 접하고 떨어질 때 발생하는 장력의 변화와 nip탄의 장착으로 인한 권취장력의 변화를 접압롤의 접압력 제어로 줄일 수 있음을 알았다. 접압롤에 의해서 권취장력을 제어할 경우 NPID 제어기의 권취장력 제어 성능이 PID 제어기보다 우수하였다.

참고문헌

- [1] K. H. Shin, "Distributed Control of Tension in Multi-Span Web Transport Systems", Ph. D. Thesis, Oklahoma State Univ., May, 1991.
- [2] Xu, Y., Ma, D., and Hollerbach, J.M., 1993, "Nonlinear proportional and derivative control for high disturbance rejection and high gain force control", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Atlanta, pp. 752-759.
- [3] K. P. Grenfell, 1963, "Tension Control on paper-making and converting Machinery", *Proc. IEEE Ninth Annual Conference on Electrical Engineering in the Pulp and Paper Industry*, Boston, Mass. June 20-21.
- [4] W. Wolfman and D. Schroder, 1987, "Application of Decoupling and State Control in Processing Machines with Continuous Moving Webs", *Proc. International Federation of Automatic Control*, Munhen.
- [5] K. N. Reid, K. H. Shin, K. C. Lin, 1992, "Variable-gain Control of Longitudinal Tension in a Web Transport System", *AMD Vol. 149, Web Handling*, ASME.
- [6] K. N. Reid, K. C. Lin, 1995, "Control of Longitudinal Tension in Multi-Span Web Transport Systems during Start Up", *Proc. on 3rd Int. Conf. on Web Handling*, pp. 77-95.
- [7] J. David Pfeiffer, 1968 "Mechanics of a Rolling Nip on Paper Webs", *Tappi*, Vol. 51, No. 8.
- [8] J. David Pfeiffer, 1977, "Nip forces and their effect on wound-in tension", *Tappi*, Vol. 60, No. 2.
- [9] Xu, Y., Ma, D., and Hollerbach, J.M., 1994, "Force and Contact Transient Control Using Nonlinear PD Control", *IEEE*, pp. 924-930.